

# QoE em streaming de vídeo: Recentes Avanços, Desafios e Trabalhos Futuros

Jailton Santos das Neves

Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Campus da Praia Vermelha – Boa Viagem – 24.210-346 – Niterói – RJ – Brasil

jaineves@gmail.com

***Resumo.** Este trabalho discute sobre QoE em streaming de vídeo, onde foi realizada uma pesquisa sobre QoE e sobre os fatores que influenciam na avaliação da qualidade do vídeo. São descritos os fatores perceptivos e técnicos do lado do servidor e do lado do cliente e analisadas as técnicas de adaptação do streaming de vídeo. Depois são examinados os avanços recentes onde descrevem-se trabalhos que utilizam as tecnologias das chamadas redes do futuro para gerenciamento de QoE e são comentados desafios e trabalhos futuros de pesquisa.*

## 1. Introdução

Nos últimos anos, a Internet tornou-se muito popular e a crescente proliferação de dispositivos inteligentes, a introdução de novos aplicativos multimídia emergentes, juntamente com um aumento exponencial na demanda e no uso de dados sem fio (multimídia), já estão criando um peso significativo para as redes celulares existentes [Agiwal, 2016]. Segundo o último relatório anual da VNI (*Visual Network Index*) da CISCO [Forecast, 2019], foi previsto que durante o período de cinco anos (2017 a 2022), o tráfego IP global será três vezes maior e alcançará 396 Exabytes por mês em 2022, o que representa um tráfego anual de 4.8 Zettabytes. Haverá mais tráfego em 2022 do que nos 32 anos que se passaram desde a criação da Internet e esse tráfego será gerado por 60% da população global, através de 28 mil milhões de dispositivos e conexões *online*, e o vídeo preencherá 82% de todo tráfego IP.

Inicialmente, a maioria das aplicações utilizava o UDP (*User Datagram Protocol*) para entrega de multimídia por ser mais simples e não usar alguns controles que acabam atrasando a entrega dos datagramas. Por outro lado, o TCP transmite os datagramas com confiabilidade, controle de erro, fluxo e de congestionamento, que tende a induzir altos atrasos na fila, mas percorre qualquer caminho de rede que suporta comunicação regular baseada em HTTP. Por esse motivo, o TCP rapidamente substituiu o UDP como padrão para entrega de multimídia [Hoffeld, 2011].

Em [Seufert, 2014], os autores afirmam que atualmente empresas como Youtube usam o HTTP *Adaptative Streaming* (HAS) como seu método padrão de entrega / reprodução, e que hoje em dia, diversos aplicativos de vídeo utilizam o HAS, pois oferece vários benefícios comparado ao *streaming* padrão. O HAS exige que o vídeo esteja disponível em várias taxas de bits, ou seja, em diferentes níveis / representações de qualidade, e dividido em pequenos segmentos, cada um contendo alguns segundos de tempo de reprodução. O cliente HAS (reprodutor de vídeo) usa um algoritmo de adaptação que verifica, dependendo da implementação do algoritmo, a largura de banda atual, *status* do *buffer* ou os dois em conjunto, e decide a taxa de bits apropriada do

próximo segmento a ser baixado, podendo interromper a reprodução se o *buffer* de reprodução estiver vazio, utilizando assim, da melhor maneira possível a largura de banda disponível.

Em [Neto, 2019], os autores afirmam que uma variedade de implementações de HAS foi desenvolvida nos últimos tempos para *streaming* de vídeo, e por esse motivo, um padrão conhecido como MPEG-DASH [Zhao, 2017] ou *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP*, foi desenvolvido pelo *Motion Picture Experts Group* (MPEG), e se tornou uma especificação de referência HAS.

De acordo com [Seufert, 2014], o HAS possibilita alterar a qualidade do vídeo durante a reprodução para se adaptar às condições atuais da rede. Se o vídeo estiver disponível em apenas uma taxa de bits e as condições mudarem, como por exemplo, se a largura de banda disponível aumentar e a taxa de transmissão for mantida, a reprodução será suave, mas poderia ter a qualidade do vídeo melhorada e não fez. No entanto, se a largura de banda disponível for menor que a taxa de bits do vídeo, teremos atrasos e paralisações o que prejudica severamente a Qualidade da Experiência (QoE) do usuário, sendo assim, o *streaming* adaptável pode melhorar a QoE do *streaming* de vídeo.

Em [Kua, 2017], os autores afirmam que alcançar alta QoE é um grande desafio devido à grande diversidade de dispositivos (*smartphones, tablets, desktops*, TVs inteligentes) e a maneira que eles estão conectados à rede (cabos, fibra, DSL, WiFi, celular sem fio), pois cada um fornece características diferentes de largura de banda. Afirmam também que com o avanço das tecnologias baseadas em DASH, há uma mudança notável da medição tradicional de QoE na qualidade do vídeo e experiência do usuário (pontuações subjetivas de opinião) para métricas de qualidade mais complexas (como tempo de *buffer*, taxa de bits do vídeo, atrasos na inicialização), que serão exploradas neste trabalho.

Este trabalho tem como objetivo apresentar os fatores que influenciam na QoE para usuários de *streaming* de vídeo e as técnicas propostas para adaptação do *streaming* de vídeo usadas no lado do servidor e no lado do cliente, para melhoria da QoE. Além disso, serão apresentados alguns trabalhos que fazem uso de tecnologias das chamadas redes futuras, para gerenciamento de QoE, assim como os desafios e propostas para trabalhos futuros. O trabalho está organizado da seguinte maneira, na Seção 2 será realizada uma breve revisão literária sobre QoE incluindo os fatores de influência de QoE para *streaming* de vídeo existentes. A Seção 3 comenta sobre os fatores perceptivos de influência de QoE para *streaming* de vídeo. A Seção 4 explora os fatores técnicos utilizados para melhoria de QoE no lado servidor e no lado do cliente, e apresenta alguns exemplos. Na Seção 5, serão examinados os recentes avanços no gerenciamento de QoE usando as tecnologias das redes futuras, desafios e trabalhos futuros e na Seção 6 serão apresentadas as conclusões finais.

## **2. QoE e os fatores de influência para QoE em streaming de vídeo**

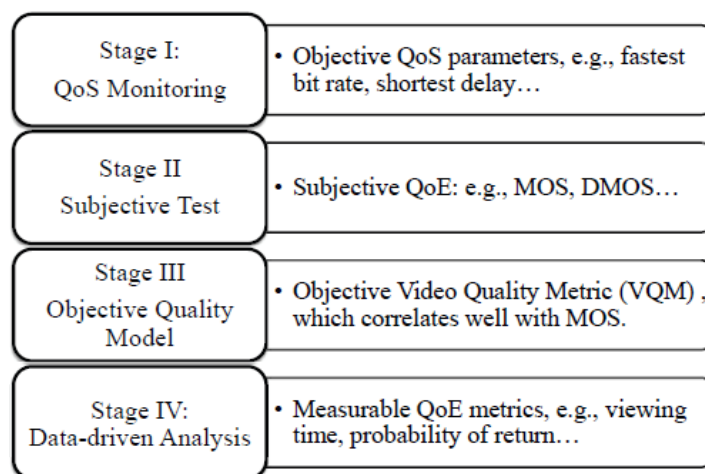
Em [Zhao, 2016], os autores afirmam que as métricas de representação de qualidade de vídeo convencionais poderiam ser resumidas em duas categorias: métricas de qualidade de sinal sendo a PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) a mais popular e amplamente aceita e as métricas de qualidade do sistema, sendo a QoS (*Quality of Service*), que mede o desempenho do sistema, a mais bem sucedida. Mas essas técnicas não incluem fatores dos usuários e contexto, por isso são incapazes de representar a verdadeira experiência

dos consumidores de vídeo. Então para superar as deficiências das métricas convencionais, surge em 2007, o termo QoE com a seguinte definição [Brunnström, 2013]: “QoE é o grau de satisfação ou aborrecimento do usuário de um aplicativo ou serviço. Resulta do cumprimento de suas expectativas em relação à utilidade e ou satisfação do aplicativo ou serviço à luz da personalidade do usuário e do estado atual”.

Sendo assim, QoS é expressa de forma objetiva por parâmetros de rede como perda de pacotes, atrasos e instabilidade e do serviço. Entretanto, uma boa QoS não garante que todos os clientes experimentem um bom serviço, por esse motivo a QoE usa o conceito de qualidade subjetiva percebida que leva em consideração como os clientes percebem o valor geral de um serviço através de critérios subjetivos [Zhao, 2016].

Em [Chen, 2014], os autores afirmam que, para o serviço de vídeo, o relacionamento entre QoE e QoS é complicado, porque embora seja importante monitorar e controlar os parâmetros de QoS do sistema de transmissão de vídeo para obter alta qualidade, é crucial avaliar a qualidade do vídeo da perspectiva dos usuários (QoE). Que a qualidade de vídeo perceptiva dos usuários é subjetiva, difícil de quantificar, medir e diversificada em diferentes ambientes de testes em laboratório. Afirmam também que para evitar o alto custo e a natureza *offline* desses testes, modelos de qualidade objetivos são desenvolvidos para prever a QoE com base em parâmetros objetivos de QoS, mas ainda é uma maneira indireta de estimar a QoE. Com a popularidade do *streaming* de vídeo pela Internet, modelos de análise de QoE orientados a dados surgiram recentemente graças à disponibilidade de dados em larga escala.

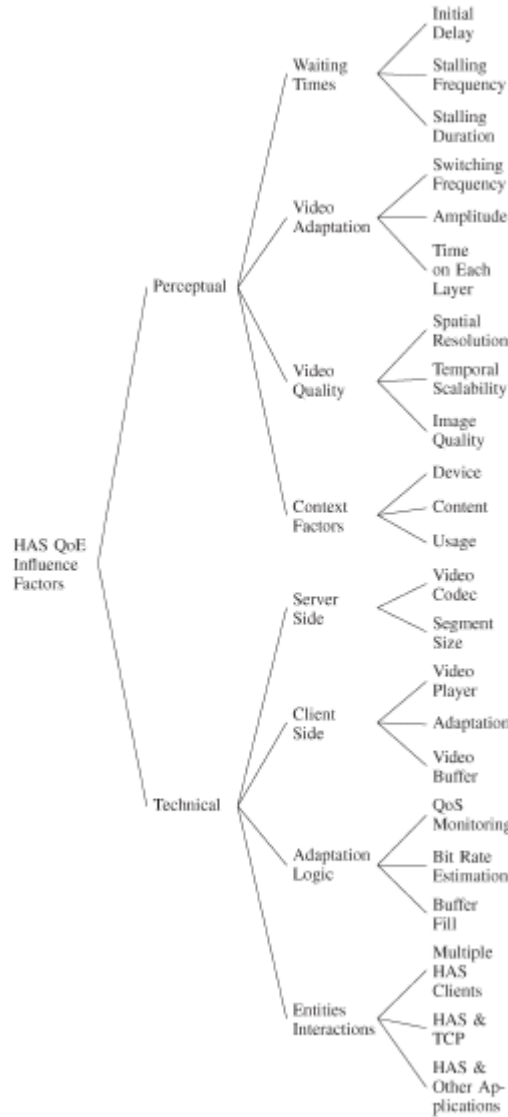
A avaliação da qualidade do vídeo passou por quatro estágios conforme [Chen, 2014], a Figura 1 mostra uma comparação desses métodos de avaliação da qualidade do vídeo.



**Figura 1. Evolução da avaliação da qualidade de vídeo [Chen, 2014]**

Em se tratando especificamente de *streaming* de vídeo HTTP, que combina *download* e reprodução simultânea, em [Seufert, 2014], os autores afirmam que, em geral, os fatores de influência da QoE podem ser categorizados em fatores de influência **técnicos e perceptivos**, conforme pode ser verificado na Figura 2. Segundo os autores, os fatores de influência perceptivos (tempo de espera, adaptação do vídeo, qualidade de vídeo, fatores de contexto) são percebidos diretamente pelo usuário final do aplicativo e são dependentes, mas dissociados do desenvolvimento técnico. No entanto, vários motivos

técnicos podem introduzir atraso inicial, mas o usuário final apenas percebe o tempo de espera. Sendo assim, é necessário analisar também os fatores de influência técnica, que direcionam a percepção dos usuários finais.



**Figura 2. Taxonomia dos fatores de influência da QoE em HAS [Seufert, 2014]**

O *streaming* de vídeo sob demanda usa a TCP para transmitir os dados do vídeo a um cliente via HTTP e o *link* de comunicação, através da Internet por exemplo, que é uma rede de melhor esforço, não garante o desempenho ponta a ponta. As redes móveis também apresentam problemas como interferências e ruídos. Os problemas de rede como perda de pacotes, largura de banda insuficiente, atraso e *jitter*, fazem com que a taxa de transferência seja reduzida e introduzirão atrasos na camada de aplicação. Como consequência, problemas na reprodução podem acontecer, tais como paralisações ou *rebuffering*, e isso vai comprometer a experiência do usuário [Seufert, 2014]. A próxima seção apresenta os fatores perceptivos e técnicos que influenciam a QoE do usuário, e o que é normalmente utilizado para amenizar os problemas encontrados.

### 3. Fatores perceptivos de influência de QoE em streaming de vídeo

Em se tratando dos fatores perceptivos, segundo [Seufert, 2014], os estudos mostram que o atraso inicial e as paralisações são os principais fatores de influência na avaliação de QoE, mas como o HAS altera a qualidade do vídeo, isso introduz um novo fator perceptivo, como discutido nas próximas subseções.

#### 3.1. Atraso inicial

Em [Seufert, 2014], os autores afirmam que o atraso inicial está sempre presente em um serviço de *streaming* multimídia, isso acontece porque uma certa quantidade de dados deve ser transferida do transmissor até o receptor antes que a decodificação e a reprodução possam efetivamente começar. Afirmam também que, na prática, o valor do atraso inicial mínimo possível depende da taxa de dados de transmissão disponível e das configurações do codificador. A reprodução do vídeo é retardada no receptor, geralmente para preencher o *buffer* de reprodução com uma quantidade maior de tempo de reprodução de vídeo.

Eles afirmam que o *buffer* de reprodução é uma ferramenta eficiente usada para lidar com variações da taxa de transferência de curto prazo. No entanto, a quantidade de tempo de reprodução inicialmente armazenado em *buffer*, precisa ser negociado entre a duração real do atraso correspondente (mais tempo de reprodução em *buffer* = atraso inicial mais longo) e o risco de esgotamento do *buffer*, ou seja, paralisação (mais tempo de reprodução em *buffer* = maior robustez a curto prazo às variações das taxas de transferência). Eles resumem informando que, em implementações de serviços de vídeo, como para qualquer serviço, os atrasos iniciais devem ser curtos, mas os atrasos iniciais não representam um problema importante de desempenho. Embora atrasos curtos possam ser desejáveis para o conteúdo gerado pelo usuário quando os usuários geralmente querem apenas dar uma olhada no vídeo, atrasos de até vários segundos serão tolerados, especialmente se os usuários pretendem assistir a um vídeo.

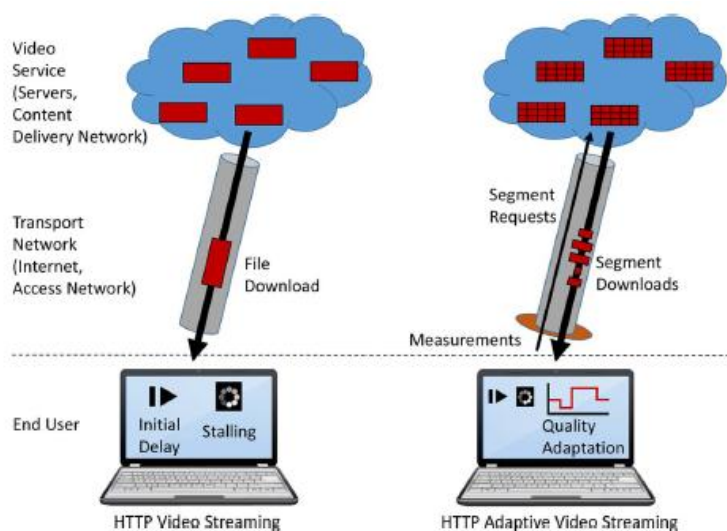
#### 3.2. Parada

Na referência [Seufert, 2014], os autores afirmam que parar é a interrupção da reprodução do vídeo devido à falta de informação no *buffer* de reprodução e que isso acontece quando a taxa de transferência do aplicativo de *streaming* de vídeo for menor que a taxa de bits do vídeo, com isso o *buffer* de reprodução é todo consumido até se esgotar. Pode acontecer que eventualmente, os dados disponíveis no *buffer* sejam insuficientes e a reprodução do vídeo não pode continuar. Nesse caso, a reprodução é interrompida até que o *buffer* contenha uma quantidade mínima de dados do vídeo. Então a quantidade do tempo de reprodução rebufferizado deve ser negociado entre a duração da interrupção (mais tempo de reprodução em *buffer* = maior duração da interrupção) e o risco de um evento de interrupção logo recorrente (mais tempo de reprodução em *buffer* = tempo de reprodução mais longo até o próximo evento de interrupção em potencial).

Para finalizar, os autores concluem afirmando que, todos os serviços de *streaming* de vídeo devem evitar a interrupção sempre que possível, pois pequenas interrupções prejudicam severamente a qualidade percebida. O *streaming* de vídeo HTTP clássico é fortemente limitado e não pode reagir a condições de redes flutuantes, que não sejam trocando o tamanho do *buffer* de reprodução e a duração da paralisação. Por outro lado, o *streaming* adaptável HTTP é mais variável e é capaz de alinhar o fluxo de vídeo entregue às condições atuais da rede, mitigando a limitação de interrupção.

### 3.3. Adaptação

Também em [Seufert, 2014], os autores afirmam que o HAS se baseia no *streaming* de vídeo HTTP clássico, mas a diferença é que o HAS possibilita alterar a qualidade do vídeo durante a reprodução para se adaptar às condições atuais da rede e o clássico não. Na Figura 2, os dois métodos são colocados lado a lado para comparação. Conforme citado na Seção 1, os autores também afirmam que para possibilitar a adaptação, o paradigma de *streaming* deve ser alterado, de modo que o cliente, que pode medir suas condições atuais de rede na borda da rede, controle qual taxa de dados é adequada para as condições atuais. No lado do servidor, o vídeo é dividido em pequenos segmentos e cada um deles está disponível em diferentes níveis / representações de qualidade (que representam diferentes níveis de taxa de bits). Com base nas medições da rede, o algoritmo de adaptação no lado do cliente solicita a próxima parte do vídeo no nível de taxa de bits apropriado, mais adequado nas condições atuais da rede.



**Figura 2. Comparação streaming de vídeo http padrão e streaming de vídeo adaptável http [Seufert, 2014]**

O HAS é uma melhoria em relação ao *streaming* de vídeo HTTP clássico, pois visa minimizar prejuízos não controlados. Comparado com *streaming* de vídeo HTTP clássico, outra dimensão (adaptação da qualidade) foi introduzida. Mas segundo os autores em [Seufert, 2014], no contexto de HAS, essa dimensão não é muito pesquisada. Portanto, na seção seguinte, serão apresentadas algumas técnicas propostas que ajudam a adaptação do HAS, utilizadas no lado do servidor e no lado do cliente. Adaptações em outras camadas (por exemplo, gerenciamento de tráfego de rede, modificação de conteúdo e etc.) não serão examinadas, porque os usuários finais acabam percebendo apenas os atrasos iniciais, paralisações ou adaptações de qualidade ao usar um serviço HAS [Seufert, 2014].

### 4. Fatores técnicos de influência de QoE em *streaming* de vídeo

Conforme mencionado na Seção 2, os fatores técnicos também influenciam na QoE dos usuários. Nesta seção, são examinadas as técnicas propostas para ajudar na adaptação do *streaming* de vídeos pré-codificados no lado do servidor e no lado do cliente. No lado do servidor, serão apresentadas técnicas propostas de soluções na camada de aplicação, na camada de transporte e no nível da rede. No lado do cliente, serão analisadas as técnicas

baseadas na taxa de transferência, baseadas no *buffer* e híbridas para ajudar na adaptação da taxa do DASH.

#### **4.1. Soluções no lado do servidor**

A maioria dos trabalhos propõem a seleção adaptativa no lado do cliente por ser mais fácil de implementar, mas também há trabalhos para otimizar a seleção de taxas de bits do lado do servidor.

##### **4.1.1. Soluções na camada de aplicação**

Em [Akhshabi, 2013], os autores afirmam que quando dois ou mais *players* de *streaming* adaptáveis, disputam largura de banda, podem ficar instáveis, por conta do padrão de atividade ON-OFF que superestima a largura da banda disponível e oscilações entre os níveis de taxa de bits do vídeo. Então eles propuseram um método de limitar (*shaping*) o tráfego baseado em servidor, para reduzir as oscilações e a instabilidade da taxa de bits de vídeo que pode levar à superestimação da largura de banda. Os autores desenvolveram um módulo *shaping*, que limita a taxa de transferência de cada bloco à taxa de codificação do bloco, de modo que a duração do *download* seja aproximadamente igual à duração do bloco. O método reduz significativamente as oscilações sem perda significativa na utilização da largura de banda. Com isso, o *shaper* é ativado apenas quando são detectadas oscilações e ajusta dinamicamente a taxa de *shaping* para que o player receba de maneira ideal a maior qualidade de vídeo disponível enquanto estiver estável. Assim é reduzido/eliminando o período OFF, desde que a largura de banda disponível seja maior que a taxa de modelagem.

Foram realizados experimentos em vários cenários (vários *players* competindo com transferência TCP persistente). Os experimentos demonstraram que funciona como esperado na prática, com uma instabilidade bem reduzida sem uma perda significativa da utilização da largura de banda. Como a modelagem introduz uma sobrecarga extra, ela só é ativada quando o servidor detecta oscilações. De acordo com [Kua, 2017], esse método é independente do cliente, mas pressupõe que os players recebam os pedaços de vídeo sucessivos do mesmo servidor (o que nem sempre é verdadeiro em situações do mundo real). Além disso, se o *shaping* do tráfego for ativado o tempo todo, o servidor não poderá detectar as variações de largura de banda. Portanto, o módulo é ocasionalmente desativado para permitir ao servidor estimar a largura de banda disponível com base na taxa de transferência TCP de pedaços não configurados.

##### **4.1.2 Soluções na camada de transporte**

Algumas soluções na camada de transporte foram implementadas para otimizar a camada e atender aos trechos de vídeo pré-codificados e armazenados em um servidor web. Protocolos de transporte alternativos, como por exemplo, MPTCP (*MultiPath* TCP), que é uma versão alternativa do TCP, foi proposto. Segundo [Barakabitze, 2018], o MPTCP foi padronizado pela IETF e a ideia principal do protocolo MPTCP é distribuir o tráfego de dados para vários caminhos desarticulados dentro da rede, dessa forma são criados vários subfluxos para uma única conexão de transporte. O lado receptor que suporta MPTCP agrega os subfluxos transmitidos e remonta os pacotes que se originam de caminhos diferentes.

A utilização dessas características pode ser útil para balanceamento de carga e agregação de largura de banda. Existem outros protocolos de transporte projetados para usar vários caminhos, mas o MPTCP está ganhando interesse na comunidade de pesquisa sobre *streaming* de vídeo. Ainda em [Barakabitze, 2018], é apresentado um trabalho onde é utilizado o MPTCP em conjunto com SDN (*Software Defined Networks*), NFV (*Network Function Virtualization*) e SR (*Segment Routing*) para oferecer QoE ponta a ponta otimizada para os usuários e os resultados dos experimentos, comparados ao reconhecimento de QoE e TCP padrão, foram superiores.

### 4.1.3. Soluções na camada de rede

Na camada de rede, também existem diversas propostas que têm como objetivo melhorar a QoE. O tráfego de vídeo distribuído usa grandes estruturas de entrega de conteúdo. Com as CDNs (*Content Delivery Network*), os clientes dos provedores desse serviço podem ter seus conteúdos disponíveis mais próximos dos seus usuários em diversas partes do mundo. Para ter essa proximidade, as operadoras de telecomunicações estão implantando suas próprias CDNs nos Pontos de Presença (POP) e podem oferecer uma melhor QoE para os usuários dos serviços.

Em [Yala, 2016], os autores apresentam o trabalho de pesquisa onde forneceram com o auxílio das tecnologias de nuvem e NFV (*Network Function Virtualization*), o serviço de CDNaaS (*Content Delivery Network-as-a-Service*) para distribuição de vídeo, e descobrir como decidir adequadamente a quantidade de recursos a serem alocados a uma instância CDNaaS. Com isso, conseguem satisfazer a QoE do usuário e superar as restrições de capacidade de recursos. Segundo os autores, o trabalho foi colocado em um ambiente de nuvem de telecomunicações privada de uma operadora, usando NFV e oferecendo interface para os clientes (provedores de conteúdo), para solicitar a implantação dinâmica de uma infraestrutura virtual de CDN (vCDN). O esquema permite que os provedores de conteúdo expressem especificações de demanda de serviço e restrições de QoE podem ser usadas para decidir sobre uma alocação inicial de recursos virtuais para uma instância específica de vCDN nas regiões em que a operadora de telecomunicações está presente.

## 4.2. Soluções no lado do cliente

### 4.2.1. Baseadas na taxa de transferência da rede

Serão apresentados aqui alguns algoritmos de adaptação da taxa para o HAS, que usam como base a medição da taxa de transferência do HTTP/TCP, alterada devido às variações na largura de banda.

Em [Liu, 2011], os autores apresentam o *Smoothed HTTP Throughput Method* (ST), que detecta alterações na largura de banda usando uma taxa de transferência HTTP suavizada, medida com base na duração do segmento de mídia e no SFT (*Segment Fetch Time*), que é a duração do *download* do último segmento. Segundo [Neto, 2019], seu objetivo é combinar a taxa de bits do segmento solicitado com a largura de banda disponível. Esse método aumenta a taxa de bits do próximo segmento quando for maior que  $1 + e$  (sendo “ $e$ ” o fator de alternância) e reduz quando for menor que o limite de alternância. Para evitar *rebuffering*, o aumento da taxa de bits ocorre apenas se o conteúdo do *buffer* de reprodução for maior que um parâmetro mínimo do nível do *buffer*. Segundo os autores em [Neto, 2019], este método também adiciona um tempo de espera antes de



transferir um novo segmento, evitando o estouro de *buffer* se a largura de banda disponível for muito maior que a taxa de vídeo. Ele não requer nenhuma informação da camada de transporte, como RTT (*Round Trip Time*) e taxa de perda de pacotes que estão disponíveis na camada TCP.

Em [Akhtar, 2018], os autores afirmam que algoritmos de última geração se baseiam em parâmetros sensíveis às condições da rede e por esse motivo pode apresentar desempenho ruim. Por esse motivo propuseram uma técnica chamada Oboe para ajustar automaticamente esses parâmetros para diferentes condições de rede. O Oboe pré-calcula, para um algoritmo ABR (*Adaptive Bitrate Streaming*), os melhores parâmetros para diferentes condições de rede, e adapta dinamicamente suas configurações, em tempo real para as condições atuais da rede. Segundo os autores, escolher configurações pelo estado da rede e pelas preferências do editor distingue a abordagem de Oboe das heurísticas usadas hoje em dia que não consideram esses fatores. Após testes, foi verificado que o Oboe melhora em muito o desempenho do BOLA, HYB e RobustMPC. Além disso, em quase 80% dos testes, o Oboe integrado ao RobustMPC melhora o QoE em relação ao Pensieve (ABR baseado em aprendizado por reforço) em média 24%, isso porque o Oboe é capaz de especializar melhor o comportamento do ABR em diferentes estados da rede.

#### 4.2.2. Baseadas em Buffer

Esta seção apresenta alguns algoritmos de adaptação propostos que usam o *status* do *buffer* para seleção da taxa. Em [Spiteri, 2016], os autores formularam o ABR como um problema de maximização de utilidade e criaram um algoritmo de controle on-line, baseado em ocupação de *buffer* chamado BOLA (*Buffer Occupancy Based Lyapunov Algorithm*) que usa técnicas de otimização de Lyapunov para minimizar o *rebuffering* e maximizar a qualidade do vídeo. O BOLA alcançou utilidade de tempo médio dentro de um fator aditivo do valor ideal. Ele é baseado em *buffer* puro que não requer nenhuma estimativa e previsão de largura de banda da rede. Os autores avaliaram o BOLA em um ambiente simulado, usando uma extensa base de dados de traces da rede e compararam os resultados, com um algoritmo *off-line* ideal e descobriram que o BOLA alcançou 84-95% do algoritmo *off-line*, utilidade quase ideal. Os autores também compararam o BOLA com outros dois algoritmos e concluíram que o BOLA é superior em termos de maior utilidade e consistência.

Em [Beben, 2016], os autores propuseram o ABMA + (*Adaptation and Buffer Management Algorithm*), que é um algoritmo de gerenciamento de adaptação também baseado em *buffer* aprimorado, que seleciona taxas de representação de vídeo com base na probabilidade prevista de congelamento de vídeo (inferida a partir da ocupação do *buffer*). Ele estima continuamente as características do tempo de *download* do segmento e usa o mapa do *buffer* de reprodução pré-calculado para selecionar a representação máxima de vídeo que garante a reprodução suave do conteúdo. Para evitar computação pesada, o algoritmo faz uso de um mapa de *buffer* pré-calculado que simplifica a implantação em diferentes terminais e minimiza os custos de computação. Os autores realizaram simulações para validar o ABMA + e ensaios experimentais usando o *plug-in* DASH do *player* VLC. Eles também compararam sua abordagem com a taxa e outras abordagens baseadas em *buffer* e confirmaram que o ABMA + ajusta de maneira mais eficiente as representações de vídeo às condições variáveis da rede, minimizando o congelamento do vídeo e evitando trocas frequentes de representação de vídeo.

### 4.2.3. Híbridas

Esta seção apresenta algoritmos híbridos de adaptação de taxa, que são baseados na taxa de transferência e na ocupação do *buffer* para selecionar a taxa de representação e assim oferecer melhor QoE para o usuário. Em [Neto, 2019], os autores propuseram uma abordagem híbrida que herda componentes da categoria baseada na taxa de transferência e também da categoria baseada em *buffer*. O RST (*Relative Smoothed Throughput*) é uma nova abordagem para o algoritmo de adaptação ST [Liu, 2011] e difere deste, principalmente nos critérios de decisão usados para aumentar, manter ou reduzir a qualidade do conteúdo do próximo segmento a ser transferido do servidor.

Os autores afirmam que, para melhor eficiência, o critério de decisão para aumentar a taxa de transferência é semelhante ao do ST, mas o cálculo é realizado de maneira diferente, ao invés de usar a maior diferença entre as representações consecutivas em que o conteúdo está disponível, usa a diferença entre a representação atual e a representação um nível acima. Para estabilidade, é aplicada uma abordagem baseada em *buffer*, onde são definidos três parâmetros de *buffer*: 1 – Nível do *buffer* de segurança que indica o tamanho mínimo do *buffer* para que o player possa aumentar o nível. 2- O parâmetro reduzir o nível do *buffer* criado no RST para melhorar a estabilidade. 3- Nível mínimo do *buffer* que representa o *buffer* mínimo permitido para reduzir o risco de *rebuffering*. Trabalhando esses critérios e parâmetros, os autores afirmam que o algoritmo apresenta uma característica híbrida, pois considera fatores relacionados a taxa de transferência dos segmentos e nível do *buffer*.

Foram realizados dois testes onde o RST foi comparado com ST e com o BOLA. No primeiro teste, foi usado um player consumindo o vídeo *Big Buck Bunny* em um link de 1Mbps por 5 minutos e *buffer* limitado a 30 segundos. No segundo teste, foram utilizados três players em um link de 3Mbps também por 5 min consumindo o mesmo vídeo. O RST se mostrou mais eficiente que o ST e comparado com o BOLA, que é considerado um dos melhores, o RST apresentou melhores resultados de eficiência com um único cliente. Comparado com o BOLA no cenário de vários clientes, o desempenho foi próximo. Em relação à instabilidade, os resultados são semelhantes ao do ST e em relação ao BOLA ainda há espaço para melhorar a estabilidade do RST.

Em [Wang, 2016], os autores propuseram o SQUAD (*Spectrum-based Quality Adaptation for DASH*) que foi projetado especificamente para garantir alta QoE e como o próprio nome diz, faz a adaptação da qualidade baseada em espectro para DASH. O algoritmo usa feedback através de saída e *buffer* para desenvolver uma técnica de adaptação de qualidade baseada em espectro para garantir alta QoE. O objetivo do algoritmo é maximizar a qualidade média e minimizar o número de alterações na qualidade, foi projetado para resolver discrepâncias na estimativa de largura de banda DASH baseada na camada de aplicação e no protocolo de transporte subjacente por estimativa de taxa nas escalas de tempo apropriadas. É utilizado o "espectro" (uma medida centralizada para a variação das taxas de bits de qualidade em torno da qualidade média) como uma métrica para capturar QoE. Segundo os autores, o SQUAD foi testado contra vários players do DASH em uma plataforma de testes controlada e em um ambiente de Internet transatlântico e os resultados mostraram que enquanto negociava pouco ou nada em termos de taxa de bits média, o SQUAD proporcionava uma QoE significativamente melhor em termos de frequência e magnitude de mudança de qualidade.

Em [Juluri, 2015], os autores propõem um algoritmo de adaptação de taxa sensível a segmento chamado SARA (*Segment Aware Rate Adaptation*) para players de vídeo DASH, que considera a variação do tamanho do segmento, além da largura de banda estimada do caminho e da ocupação atual do *buffer* para prever com precisão o tempo necessário para o *download* do próximo segmento. Segundo os autores, para cada vídeo, o servidor cria um MPD (*Media Presentation Description*), que é um arquivo de formato XML que lista todas as representações, informações de segmento e URLs de segmento para cada representação. O esquema de adaptação proposto, aprimora o arquivo MPD para conter os tamanhos dos segmentos e ajuda o SARA a considerar os efeitos de tamanhos de segmentos variáveis na largura da banda medida. Os autores também desenvolveram um reprodutor de vídeo DASH emulado de código aberto baseado em Python, usado para comparar o desempenho do SARA e um ABR básico. Nos testes realizados, o algoritmo foi comparado com um esquema básico de adaptação que usa apenas a taxa de *download* do segmento e foi demonstrado que, com baixa largura de banda de rede, o esquema tem melhores vantagens. A melhoria no desempenho foi medida usando duas métricas: a medida de qualidade relativa (Qratio) e o número de eventos de troca de taxa de bits. Os resultados mostraram que o SARA fornece um ganho significativo em relação ao algoritmo básico na qualidade do vídeo entregue, sem afetar visivelmente as taxas de troca de vídeo.

## **5. Recentes avanços, Desafios e trabalhos futuros**

Nesta seção são examinados trabalhos recentes que utilizam as tecnologias das chamadas redes futuras como SDN, NFV, *Fog Computing*, IoT e 5G, no gerenciamento de QoE para *streaming* de vídeo adaptável.

### **5.1. Integração com SDN, NFV**

Em [Barakabitze and Barman, 2019] os autores contextualizam que os aplicativos multimídia OTT (*Over The Top*) que são altamente exigentes, impõem desafios maiores aos ISPs (*Internet Service Providers*) para que garantam QoE razoável a seus clientes devido à falta de flexibilidade, agilidade e escalabilidade nos sistemas tradicionais. Eles afirmam que como as redes futuras estão mudando para a “cloudificação” dos recursos de rede por meio de SDN e NFV, isso fará com que os ISPs se equipem com tecnologia de ponta e para fornecer personalização dos serviços e QoE que atenda às necessidades dos clientes, por meio de abordagens inteligentes de controle e gerenciamento de QoE.

Os autores então fornecem um tutorial e uma pesquisa abrangente sobre soluções de gerenciamento de QoE em redes atuais e futuras, sobre as soluções HAS como técnica dominante para transmitir vídeos pela Internet de melhor esforço. Apresentam em resumo os elementos chave do SDN/NFV juntamente com uma visão geral dos projetos de pesquisa em andamento, atividades de padronização e casos de uso relacionados ao SDN, NFV e outros aplicativos emergentes. Fornecem uma pesquisa das técnicas de gerenciamento de QoE de última geração categorizada em três grupos diferentes: a) Estratégias orientadas para QoE usando SDN e ou NFV; b) Abordagens orientadas a QoE / direcionadas para *streaming* adaptável em arquiteturas emergentes, como computação de borda de acesso múltiplo, computação em nuvem / nevoeiro e redes centradas em informações; e c) abordagens estendidas de gerenciamento de QoE em novos domínios, como aplicativos de realidade virtual aumentada e imersiva, mulsemídia e videogame.

Em [Grigoriou, 2017], os autores propõem um novo mecanismo de alocação de recursos orientado a QoE para atribuir dinamicamente tarefas a nós de rede virtual, a fim de obter uma qualidade de ponta-a-ponta otimizada em redes habilitadas para SDN/NFV. O objetivo do mecanismo é encontrar a melhor combinação de funções de nós da rede que possam cooperar e fornecer um nível otimizado de QoE para os usuários finais através da cooperação do nó. Segundo os autores, o serviço é dividido em tarefas e os nós vizinhos negociam a atribuição destes considerando a qualidade final. Eles focam especificamente no serviço de *streaming* de vídeo. Também mostram que a agilidade fornecida por SDN/NFV é um fator essencial para melhorar a qualidade do vídeo, a alocação de recursos e o gerenciamento de QoE em redes futuras. Resultados preliminares baseados no emulador de rede Mininet e no controlador *OpenDaylight* mostraram que a abordagem deles pode melhorar significativamente a qualidade de um vídeo transmitido, selecionando o melhor caminho com valores de QoS normalizados.

Em [Barakabitze, 2018], conforme mencionado na Seção 4.1.2, também fazem uso do SDN e NFV para oferecer QoE ponta-a-ponta aos usuários. Em [Barakabitze, 2019], é proposta uma arquitetura NFV habilitada para SDN, que tem como objetivo melhorar a QoE oferecendo controle e gerenciamento de aplicativos de *streaming* de vídeo em sistemas 5G. Segundo os autores, essa nova arquitetura oferece recursos para superar as principais limitações de provisionamento de QoE nos sistemas 4G atuais como maior complexidade de gerenciamento de rede e incapacidade de adaptação dinamicamente para alterar aplicativos, transmissão / tráfego de rede ou demanda do usuário final. A arquitetura QoE-*softwarized* proposta ajudaria no projeto e implementação de esquemas de controle e gerenciamento de QoE para futuros serviços multimídia.

## **5.2. Fog Computing, IoT e 5G**

Em [Mahmud, 2019], os autores contextualizam informando que a computação em névoa visa oferecer serviços em nuvem na borda da rede para fornecer suporte a aplicativos da Internet das Coisas (IoT), com requisitos de resposta de baixa latência. Informam também que a natureza hierárquica, distribuída e heterogênea das instâncias computacionais faz da alocação de aplicativos *fog* uma tarefa desafiadora e que as expectativas diversificadas dos usuários e os diferentes recursos dos dispositivos IoT também intensificam o problema de alocação do aplicativo. Portanto, o posicionamento de aplicativos em instâncias compatíveis do Fog com base nas expectativas do usuário pode aprimorar a Qualidade da Experiência (QoE) em relação aos serviços do sistema. Então, eles propõem uma política de alocação/posicionamento de aplicativos com reconhecimento de QoE que prioriza diferentes solicitações de posicionamento de aplicativos de acordo com as expectativas do usuário e calcula os recursos das instâncias do *fog*, considerando seu status atual.

No ambiente de *Fog Computing*, ele também facilita a alocação de aplicativos em instâncias *fog* adequadas, para que a QoE do usuário seja maximizada em relação ao acesso a serviços públicos, consumo de recursos e prestação de serviços. Os autores afirmam que a política proposta foi avaliada simulando um ambiente *fog* usando o iFogSim e os resultados experimentais indicaram que a política melhora significativamente o tempo de processamento de dados, o congestionamento da rede, a disponibilidade de recursos e a qualidade do serviço. Com isso, os usuários de serviços

multimídia, incluindo *streaming* de vídeo que utilizam o sistema também seriam beneficiados.

Em [Zheng, 2018], os autores afirmam que o serviço de vídeo se tornou um aplicativo matador (*killer app*) para terminais móveis e que para fornecer esses serviços, a maior parte do tráfego é transportada pela técnica DASH. Seguem afirmando que a chave para melhorar a qualidade do vídeo percebida pelos usuários (QoE) é caracterizá-lo efetivamente usando dados medidos. Então os autores propuseram um esquema de previsão de QoE em tempo real na borda da rede, assistido por *fog*, que pode prever a QoE do fluxo de vídeo suportado por DASH usando nós de *fog*. Como a solução é baseada no monitoramento do tráfego de rede, isso significa que funciona sem a participação de clientes e servidores. Além disso, a solução proposta não precisa de análise profunda de pacotes, o que facilita a implantação desse esquema. Resultados experimentais mostraram que esse esquema pode detectar com precisão a QoE (eventos de *buffer* com cerca de 98%), mesmo quando o tráfego de vídeo é criptografado.

Em [Jalal, 2018], os autores afirmam que em um contexto de transmissão de TV inteligente, especialmente em um ambiente doméstico, para proporcionar efeitos adicionais, os dispositivos habituais (por exemplo, ar condicionado, luzes etc.), fornecidos com recursos inteligentes oportunos, devem ser preferidos aos dispositivos *ad-hoc*, geralmente implantado em outros aplicativos, como, por exemplo, em sistemas de jogos. Nesse contexto, uma questão fundamental é a interconexão entre a TV inteligente e os dispositivos personalizados que oferecem efeitos sensoriais adicionais ao usuário. Em casos de uso doméstico inteligentes, o paradigma IoT foi amplamente adotado para conectar dispositivos inteligentes. Eles então apresentam uma arquitetura baseada em IoT para entrega de mídia multissensorial a usuários de TV em um cenário de entretenimento doméstico. Afirmam que na estrutura proposta, os dispositivos domésticos habituais, agem como objetos inteligentes interconectados via rede IoT à TV inteligente e desempenham um papel importante na implementação de efeitos adicionais ao serviço de TV de transmissão convencional. A ideia seria enriquecer a multimídia tradicional com efeitos adicionais, auxiliados pela IoT e obter melhor QoE para os usuários ao consumir de provedores de conteúdo, filmes e programas de TV para *download* ou *streaming* direto na Internet.

Eles analisaram os requisitos em termos de sincronização entre mídia e dispositivos e a arquitetura do sistema foi definida. Além disso, um protótipo foi implementado em um cenário doméstico inteligente real, com dispositivos reais, o que permitiu uma pesquisa subjetiva de medição de teste para avaliar a qualidade da experiência dos usuários e a viabilidade do serviço de TV multimídia sensorial proposto. Os resultados mostraram a viabilidade da abordagem proposta em termos de restrição de sincronização, aumento do senso de realidade e satisfação geral dos usuários. A solução de IoT permite implementar o sistema em um cenário doméstico inteligente real, sem a necessidade de implantar hardware específico dedicado. Além disso, a abordagem de IoT permite escalabilidade e também a possibilidade de adicionar recursos personalizados ao sistema geral. Em um cenário de casa inteligente, as preferências do usuário podem ser salvas pela arquitetura IoT e a configuração dos dispositivos pode ser ajustada. No entanto, os autores informaram que os testes de avaliação da QoE destacaram alguns problemas que precisam ser mais investigados em trabalhos futuros.

Na referência [Agiwal, 2016], os autores afirmam que os sistemas sem fio 5G, com melhores taxas de dados, capacidade, latência e QoS, devem ser a panaceia da maioria dos problemas atuais das redes celulares. Então eles realizaram uma revisão exaustiva da evolução sem fio em direção às redes 5G. Discutem sobre as novas aplicações emergentes, como comunicações D2D (*Device to Device*) e M2M (*Machine to Machine*), IoT, comunicações veiculares e aplicativos de assistência médica, que formam a principal força motriz por trás do 5G e analisam os detalhes desses aplicativos matadores para entender o impacto associado na evolução celular. Para entender a experiência aprimorada do usuário, destacam os novos recursos de QoS, QoE e SON associados à evolução do 5G. Eles afirmam que o 5G tem oito requisitos principais dos sistemas da próxima geração, são eles: 1-Taxa de dados de 10Gbps em redes reais (LTE tradicional é 150Mbps); 2-Latência de ida e volta de 1ms (4G é de 10ms); 3-Alta largura de banda na área da unidade; 4-Enorme número de dispositivos conectados; 5-Disponibilidade percebida de 99,999%; 6-Quase 100% de cobertura por conectividade a qualquer hora em qualquer lugar; 7-Redução no uso de energia em quase 90%; 8-Bateria de alta duração. Espera-se que atendendo a esses requisitos, o 5G seja a solução para diversos problemas existentes e de fato, melhore o QoE para os usuários de diversos serviços, inclusive de *streaming* de vídeo.

### 5.3. Desafios e trabalhos futuros

Com a chegada das chamadas redes definidas por *software*, elas trazem consigo diversos desafios e oportunidades de pesquisa. Na referência [Barakabitze and Barman, 2019], os autores realizaram uma pesquisa ampla na área de gerenciamento de QoE para serviços de *streaming* multimídia em redes do futuro. Eles exploraram as tecnologias e resumiram os desafios de gerenciamento de QoE em redes definidas por *software* futuras e identificaram algumas oportunidades de pesquisa para futuras explorações, especialmente na área de gerenciamento de QoE e orquestração de recursos, *streaming* adaptável HTTP usando QUIC / MPTCP, protocolos da camada de transporte, serviços e aplicativos emergentes de multimídia e gerenciamento de serviço colaborativo, conforme segue:

- **Colaboração entre OTTPs (Over The Top Providers) e ISP** – Necessidade de soluções colaborativas de gerenciamento de serviços com reconhecimento de QoE, incluindo a arquitetura de referência, algoritmos de otimização para o gerenciamento de serviços e modelos de negócios.
- **Aplicações Multimídia Emergentes** - Mecanismos para garantir a QoE para VR (*Virtual Reality*) /AR (*Augmented Reality*), Mulsemídia, *videogame* e *display* de campos de luz. Os modelos atuais de QoE para entrega de fluxos de vídeo adaptativos têm três limitações: (1) eles são desenvolvidos para capturar o comportamento do usuário "média" e, portanto, alguns deles não são personalizados, (2) eles não consideram o contexto em que a sessão de *streaming* ocorre e (3) apenas o modelo de QoE dos usuários é inserido no *loop* de controle, mas não o próprio usuário. Portanto, o uso de parâmetros de rede, aplicativos e nível de usuário, pode permitir a criação de modelos personalizados de QoE de serviços multimídia emergentes.
- **Gerenciamento e orquestração** - O gerenciamento e a orquestração dos recursos SDN e NFV no contexto de FNs (Future Networks). Os esquemas de gerenciamento baseado em software com reconhecimento de QoE para serviços de entrega de multimídia em FNs ainda não são cobertos.

- **Streaming Adaptável HTTP sobre MPTCP / QUIC, Streaming Imersivo de Vídeo** - São necessárias mais investigações sobre o impacto de MPTCP / QUIC e SR no streaming adaptável em redes 5G baseadas em *software*. Para *streaming* de vídeo imersivo, a solução dependente da janela de exibição para *streaming* de VR em sistemas de comunicação futuros deve ser mais investigada.
- **Codificação de vídeo** - Muitas estratégias atuais de codificação de vídeo estão focadas na melhoria dos codecs existentes ou no desenvolvimento de codificadores mais recentes para obter maior eficiência de compactação, especialmente para novos conteúdos (por exemplo, HDR, AR / VR e *videogame*), de modo a reduzir a largura de banda de transmissão necessária. No entanto, com a chegada das comunicações IoT e M2M nas redes 5G, é imperativo para a indústria e a academia a criação de soluções mais recentes que atendam às novas exigências de tais aplicações (como codificadores de baixo atraso, baixa potência e baixa complexidade).

Ainda na referência [Barakabitze and Barman, 2019], os autores observaram que apesar dos esforços recentes para superar os desafios de controle e gerenciamento de QoE hoje, e a rápida evolução de SDN e NFV em direção a futuros sistemas de comunicação, ainda existem lacunas significativas em algumas áreas que precisam de extensa pesquisa e investigação. Eles afirmam que para lidar com a velocidade com que SDN e NFV estão sendo propostos pelos provedores de serviços e pelo MNO (*Mobile Network Operator*) para provisionamento de QoE para os usuários finais, mais pesquisas relacionadas aos serviços multimídia devem ser realizadas nas seguintes áreas vitais que não foram exploradas extensivamente no passado: compartilhamento e divisão de recursos de rede orientados para QoE, modelos de negócios de QoE em infraestruturas de redes definidas por *software*, estratégias inteligentes de big data baseadas em QoE, escalabilidade, resiliência e otimização em SDN / NFV, desempenho da rede, avaliação e benchmarks, novos modelos baseados em QoE de segurança, privacidade e confiança em redes 5G futuras definidas por *software*. Segue resumo dos desafios e recomendações de pesquisas em SDN/NFV:

- **Estratégias para Big Data** – É necessário criar um procedimento de modelagem dinâmica baseado em QoE para alavancar o big data em rede definidas por *software* do futuro.
- **Escalabilidade, Resiliência e Otimização de QoE** – Desenvolvimento de um modelo de otimização multiobjectivo com reconhecimento de QoE para posicionamento de controladores SDN e VNFs / VNFMs (*Virtual Network Function Management*) em redes futuras. Seria interessante desenvolvimento de algoritmos de alocação de recursos baseados em QoE que considerem vários domínios e VNFs distribuídas, gerenciamento dinâmico de recursos baseado em QoE e capacidade de sobrevivência da rede em SDN.
- **Compartilhamento e fatiamento (*slicing*) de rede** - Os problemas relacionados ao posicionamento das NFs (*Network Functions*) em uma fatia, orquestração da fatia ou serviços *inter-domain*, precisam ser estudados mais detalhadamente para constatar a eficácia do NS em redes definidas / controladas por *software*. O isolamento entre as fatias, o gerenciamento de mobilidade, a criação dinâmica de fatias e os aspectos de segurança precisam de grandes esforços de pesquisa.
- **Modelos de negócios de QoE** - Desenvolvimento de novos modelos de negócios de QoE. Isso ocorre porque os SLAs (*Service Layer Agreement*) usados , não são

apropriados como meio de fornecer contratos de QoE entre prestadores de serviços e clientes em FNs.

- **Desempenho, avaliação e *benchmarks* de rede** - Desenvolvimento de metodologia de avaliação de desempenho e ferramenta de *benchmarking* (por exemplo, TRIANGLE e Open5GCore) que ajudariam os desenvolvedores de aplicativos e fabricantes de dispositivos a testar novos aplicativos, dispositivos e serviços. É importante também desenvolver testes de virtualização, como o OpenSDNCore, que proporcionará uma implementação prática dos futuros paradigmas de evolução de rede, alavancando o ambiente NFV / SDN.
- **Segurança, Privacidade e Confiança** - O impacto da criptografia de tráfego na QoE dos usuários através de redes definidas por *software*, é uma área urgente que precisa de investigação. Da mesma forma, novos modelos personalizados de QoE em FNs que incluem privacidade e segurança, além de métricas clássicas de *streaming* de vídeo por SDN / NFV, precisam ser desenvolvidos.

Na área de segurança, em se tratando de redes definidas por *software* futuras, é preciso especial atenção para um componente da infraestrutura, o controlador SDN. Ele é muito importante na topologia, porque é uma entidade centralizada na tomada de decisões, que gerencia recursos e vários serviços da rede, por esse motivo ele precisa ser protegido contra ataques cibernéticos. Além disso, novas vulnerabilidades podem surgir com a integração de SDN e outras tecnologias.

## 6. Considerações finais

Este trabalho apresentou uma pesquisa sobre QoE em *streaming* de vídeo. Foi realizada uma pesquisa sobre QoE e sobre os fatores que influenciam na avaliação da qualidade do vídeo (perceptivos e técnicos). Os fatores perceptivos foram descritos e na sequência os fatores técnicos do lado do servidor e do lado do cliente onde foram analisadas as técnicas de adaptação do *streaming* de vídeo. Depois foram examinados os avanços recentes e descritos alguns trabalhos que utilizam as tecnologias das chamadas redes do futuro SDN, NFV, *Fog Computing*, IoT e 5G para gerenciamento de QoE. Pelos trabalhos analisados, a tecnologia SDN contribui de maneira significativa para oferecer melhor QoE para os usuários de serviços multimídia, onde está incluso o serviço de *streaming* de vídeo. Conclui-se apresentando alguns desafios de gerenciamento de QoE para serviços de multimídia em redes definidas por *software* futuras e oportunidades de pesquisa para trabalhos futuros também em gerenciamento de QoE, com especial atenção para segurança em SDN.

## 7. Referências

- Agiwal, M., Roy, A., and Saxena, N. (2016). "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(3), 1617-1655.
- Akhshabi, S., Anantkrishnan, L., Dovrolis, C., and Begen, A. C. (2013). "Server-based traffic shaping for stabilizing oscillating adaptive streaming players." In *Proceeding of the 23rd ACM workshop on network and operating systems support for digital audio and video* (pp. 19-24).
- Akhtar, Z., Nam, Y. S., Govindan, R., Rao, S., Chen, J., Katz-Bassett, E., ... and Zhang, H. (2018). "Oboe: auto-tuning video ABR algorithms to network conditions."



- In Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (pp. 44-58).
- Barakabitze, A. A., Barman, N., Ahmad, A., Zadtootaghaj, S., Sun, L., Martini, M. G., and Atzori, L. (2019). "QoE management of multimedia streaming services in future networks: a tutorial and survey." *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(1), 526-565.
- Barakabitze, A. A., Mkwawa, I. H., Sun, L., and Ifeakor, E. (2018). "QualitySDN: Improving video quality using MPTCP and segment routing in SDN/NFV." In 2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft) (pp. 182-186). IEEE.
- Barakabitze, A. A., Sun, L., Mkwawa, I. H., and Ifeakor, E. (2019). "A novel QoE-aware SDN-enabled, NFV-based management architecture for future multimedia applications on 5G systems." arXiv preprint arXiv:1904.09917.
- Beben, A., Wiśniewski, P., Batalla, J. M., and Krawiec, P. (2016). "ABMA+ lightweight and efficient algorithm for HTTP adaptive streaming." In Proceedings of the 7th International Conference on Multimedia Systems (pp. 1-11).
- Brunnström, K., Beker, S. A., De Moor, K., Dooms, A., Egger, S., Garcia, M. N., ... and Lawlor, B. (2013). "Qualinet White Paper on Definition of Quality of Experience." European Network on Quality of Experience in Multimedia Systems and Services (COST Action IC 1003), v1.2, March 2013.
- Chen, Y., Wu, K., and Zhang, Q. (2014). "From QoS to QoE: A tutorial on video quality assessment." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(2), 1126-1165.
- Forecast, G. M. D. T. (2019). "Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2017–2022." Update, 2017, 2022.
- Grigoriou, E., Barakabitze, A. A., Atzori, L., Sun, L., and Pilloni, V. (2017). "An SDN-approach for QoE management of multimedia services using resource allocation." In 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC) (pp. 1-7). IEEE.
- Hoßfeld, T., Seufert, M., Hirth, M., Zinner, T., Tran-Gia, P., and Schatz, R. (2011). "Quantification of YouTube QoE via crowdsourcing." In 2011 IEEE International Symposium on Multimedia (pp. 494-499). IEEE.
- Jalal, L., Anedda, M., Popescu, V., and Murrioni, M. (2018). "QoE assessment for IoT-based multisensorial media broadcasting." *IEEE Transactions on Broadcasting*, 64(2), 552-560.
- Juluri, P., Tamarapalli, V., and Medhi, D. (2015). "SARA: Segment aware rate adaptation algorithm for dynamic adaptive streaming over HTTP." In 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW) (pp. 1765-1770). IEEE.
- Kua, J., Armitage, G., and Branch, P. (2017). "A survey of rate adaptation techniques for dynamic adaptive streaming over HTTP." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(3), 1842-1866.
- Liu, C., Bouazizi, I., and Gabbouj, M. (2011). "Rate adaptation for adaptive HTTP streaming." In Proceedings of the second annual ACM conference on Multimedia systems (pp. 169-174).

- Mahmud, R., Srirama, S. N., Ramamohanarao, K., and Buyya, R. (2019). "Quality of Experience (QoE)-aware placement of applications in Fog computing environments." *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 132, 190-203.
- Neto, P. C. L., Albuquerque, C.V.N., and Muchaluat-Saade, D. C. (2019). "The Relative Smoothed Throughput Approach for Adaptive HTTP Streaming." In 2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) (pp. 1-6). IEEE.
- Seufert, M., Egger, S., Slanina, M., Zinner, T., Hoßfeld, T., and Tran-Gia, P. (2014). "A survey on quality of experience of HTTP adaptive streaming." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), 469-492.
- Spiteri, K., Urgaonkar, R. and Sitaraman, R.K. (2016). "BOLA: Near-optimal bitrate adaptation for online videos." *IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2016.
- Wang, C., Rizk, A., and Zink, M. (2016). "SQUAD: A spectrum-based quality adaptation for dynamic adaptive streaming over HTTP." In *Proceedings of the 7th International Conference on Multimedia Systems* (pp. 1-12).
- Yala, L., Frangoudis, P. A., and Ksentini, A. (2016). "QoE-aware computing resource allocation for CDN-as-a-service provision." In 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) (pp. 1-6). IEEE.
- Zhao, S., Li, Z., Medhi, D., Lai, P., and Liu, S. (2017). "Study of user QoE improvement for dynamic adaptive streaming over HTTP (MPEG-DASH)." In 2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) (pp. 566-570). IEEE.
- Zhao, T., Liu, Q., and Chen, C. W. (2016). "QoE in video transmission: A user experience-driven strategy." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1), 285-302.
- Zheng, H., Zhao, Y., Lu, X., and Cao, R. (2018). "A mobile fog computing-assisted DASH QoE prediction scheme." *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018.