

Método para o Aumento de Usuários Satisfeitos em Vídeo Streaming em Redes LTE

Evandro Luis Copercini, Joel Aparecido Barbosa Junior, Carlos Alexandre G. da Silva e Carlos Marcelo Pedroso

Resumo— A popularização dos *smartphones* levou a um crescimento acentuado do tráfego de vídeo *streaming* em redes móveis, que já é a principal aplicação da rede em termos de tráfego. O vídeo *streaming* demanda recursos de qualidade de serviço (QoS, *quality of service*) para seu correto funcionamento. Em sistemas *Long-term Evolution* (LTE) a qualidade de serviço depende do uso de métodos de escalonamento de recursos apropriados na rede rádio. Neste artigo é proposto um novo método de escalonamento de recursos para redes LTE com o objetivo de aumentar o número de usuários de vídeo *streaming* satisfeitos. Os resultados são comparados com algoritmos de escalonamento em uso atualmente. A avaliação de desempenho foi realizada através de simulações computacionais. Os resultados mostram que o uso do método proposto resulta em um aumento significativo do número médio de usuários de vídeo *streaming* satisfeitos, principalmente em situações de maior congestionamento.

Palavras-Chave— LTE, escalonamento de recursos, redes móveis, vídeo *streaming*.

Abstract— The popularization of smartphones has led to a growth in video traffic on mobile networks, which is already the main application of the network. The video streaming requires certain levels of quality of service. The quality of service in LTE (Long Term Evolution) systems is implemented using resource schedulers. In this paper is presented a new resource scheduler algorithm aiming to increase the number of video streaming users served with minimum QoS (Quality of Service) requirements. The results are compared with the scheduling algorithms commonly used. The performance evaluation was done through computer simulations. The results show that the use of proposed method leads to a significant increase in average satisfied video streaming users, mainly under heavy network traffic load.

Keywords— LTE, resource schedulers, mobile networks, video streaming.

I. INTRODUÇÃO

Na última década tem ocorrido um crescimento de aplicações de mídia *streaming*, principalmente devido ao rápido desenvolvimento de tecnologias e o notável crescimento na quantidade de dispositivos móveis. Atualmente é comum o acesso a serviços de vídeo *streaming* através de vários dispositivos conectáveis à Internet, como estações de jogo, *smartphones* e *tablets*. Já o número de usuários de redes móveis excedeu a metade da população mundial nos últimos anos [1] [2]. De acordo o relatório *Cisco Visual Networking Index* [3], em 2016 o tráfego de dados móveis globais cresceu 63% e atingiu 7,2 exabytes por mês no final de 2016, contra 4,4 exabytes por mês no final de 2015. Devido à crescente popularidade dos serviços de *streaming* de vídeo, os usuários

estão aumentando continuamente suas expectativas por melhores serviços [4]. Essas expectativas são ainda maiores quando os dispositivos já são capazes de suportar conteúdo *real-time* de vídeo em 4K e HD (*High Definition*) o que aumenta significativamente o consumo de tráfego em redes móveis [1].

O *long-term evolution* (LTE), especificado pelo *Generation Partnership Project* (3GPP) [5], é o padrão utilizado para implementação da quarta geração de redes móveis, adotada no Brasil e em grande parte do mundo. Um dos componentes principais do LTE é a rede rádio (RAN, *radio area network*), uma interface de rádio altamente flexível e permite que a partir de uma estação rádio base diversos usuários sejam conectados através de infraestrutura de comunicação sem fio e tenham acesso à serviços de internet [6]. O LTE divide a largura de banda total em subportadoras, permitindo que múltiplos usuários acessem diferentes serviços, como por exemplo os de vídeo *streaming*. Já a alocação de recursos aos equipamentos de usuário (UE, *user equipment*) é realizada de forma centralizada na estação rádio base, chamada de eNodeB (*evolved node B*), através de um algoritmo de escalonamento de recursos. O 3GPP não especifica o algoritmo de escalonamento de recursos que deve ser utilizado, deixando a critério dos desenvolvedores de equipamentos e fabricantes a escolha do método [6].

Neste artigo é proposto um novo algoritmo de escalonamento de recursos para sistemas LTE, com o objetivo de aumentar o número de usuários atendidos em aplicações de vídeo *streaming*. O usuário foi considerado atendido caso receba recursos mínimos de rede para transmissão de vídeo em termos de atraso, *jitter* médio e perdas. O desempenho do método proposto foi avaliado através de simulações computacionais e os resultados obtidos são comparados com os principais escalonadores em uso atualmente. O uso do método proposto resultou em aumento do número de usuários de vídeo *streaming* atendidos.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A sessão II apresenta conceitos referentes ao escalonamento de recursos no LTE e os trabalhos relacionados. Na sessão III o escalonador proposto é apresentado, e por último na sessão IV são descritos os resultados e discussões das simulações realizadas. A sessão V apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

II. ESCALONAMENTO DE RECURSOS NO LTE

Comparado com a tecnologias de redes móveis de terceira geração, o LTE oferece taxas de dados mais altas, menor latência, uso mais flexível do espectro e maior eficiência espectral. O LTE utiliza a técnica de modulação OFDM (*orthogonal frequency-division multiplexing*) no *downlink* (DL) e

Evandro L. Copercini, Joel A. Barbosa Junior, Carlos A. G. da Silva e Carlos M. Pedroso. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, Brasil, E-mails: evandrocopercini@yahoo.com, joel.ctba@hotmail.com, carlos.gouvea@ufpr.br, pedroso@eletrica.ufpr.br

SC-FDM (*single-carrier FDM*) no *uplink* (UL), melhorando a experiência dos usuários na comunicação de dados em banda larga [7]. As taxas de pico chegam a 75 Mbps no *downlink* em um sistema com uma única antena e o sistema pode ser configurado para trabalhar com larguras de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz para atender a necessidades de alocação de espectro de diferentes tamanhos em diferentes faixas [8]. O eNodeB escolhe a técnica de modulação a ser usada em função da estimação da qualidade de canal. A qualidade de canal é informada através do CQI (*channel quality indicator*). As técnicas de modulação disponíveis são o DPSK, 16-QAM e 64-QAM, que transmitem respectivamente 1, 4 e 6 bits por símbolo. Desta forma, dependendo da qualidade do canal a taxa de transmissão máxima pode variar entre cerca de 12,5 Mbps e 75 Mbps em um sistema com uma antena.

O elemento central da RAN é a eNodeB, que permite a conectividade entre os UEs. A eNodeB é semelhante às estações rádio base (ERBs) do sistema *Global System for Mobile Communications* (GSM), que no LTE executa diversas funções, incluindo gerenciamento de recursos de rádio, controle de admissão, escalonamento de recursos, *broadcast* de informações da célula, criptografia, compressão e descompressão de cabeçalhos de pacotes. Além de fazer a interface com os UEs, a eNodeB hospeda as camadas *PHYsical* (PHY), *Radio Link Control* (RLC), *Medium Access Control* (MAC), *Packet Data Control Protocol* (PDCP) e a funcionalidade de *Radio Resource Control* (RRC).

A. Alocação de recursos no LTE e outros escalonadores

A alocação de recursos no LTE é feita com base em uma grade tempo-frequência. No domínio do tempo, são usados quadros de 10 ms, que por sua vez são divididos em 10 subquadros de 1 ms. Cada subquadro é dividido em 2 slots de 0,5 ms. Estes *slots* são divididos no domínio da frequência em N partes de 180 KHz, chamadas de *resource blocks* (RB), que constitui o elemento básico de alocação de recurso de rádio no LTE. A unidade mínima de alocação de recurso compreende um agrupamento de RBs no tempo, denominada de RBG (*resource block group*). O tamanho da RBG depende da largura de banda utilizada. Por exemplo, em sistema com largura de banda de 5 MHz o RBG compreende 2 RBs e em sistemas de 20 MHz, 4 RBs.

O escalonamento de recursos é feito pela eNodeB para todas as UEs conectadas a ele, em intervalos de tempo denominados *Transmission Time Interval* (TTI), sendo esse intervalo de tempo o mesmo de um subquadro com duração de 1 ms [9]. No *downlink* a eNodeB analisa os endereços de destino dos pacotes em seu *buffer* de entrada, que devem ser encaminhados para as UEs na RAN. Com o conhecimento dos destinos, a eNodeB aloca os RBGs a serem utilizados pelas UEs no próximo TTI utilizando um algoritmo de escalonamento e informa para todos os UEs utilizando um dos canais de sinalização.

A seguir são descritos os principais algoritmos de escalonamento de recursos em uso no LTE:

1) *Round Robin* (RR): este escalonador atribui os RBGs de forma sequencial às UEs sem levar em conta as condições do

canal. Este é um procedimento simples, que distribui a mesma quantidade de RBGs para cada UE ativa, mas oferece um fraco desempenho em termos de *throughput* [10].

2) *Proportional Fair* (PF): o algoritmo procura encontrar um equilíbrio entre justiça e eficiência espectral, onde os RBGs são distribuídos de tal forma a obter o mesmo *throughput* entre todos os UEs. Esse equilíbrio é fornecido utilizando o *throughput* médio passado como um fator de ponderação da taxa de dados esperada, o que resulta atribuir mais RBGs para UEs com baixa qualidade de canal [11] [12].

3) *Maximum Throughput* (MT): o eNodeB atribui o RBG à UE com a maior taxa de dados instantânea calculada pelo CQI, visando maximizar o *throughput* total da RAN. Esta estratégia pode deixar alguns usuários com poucos ou sem nenhum recurso, pois prioriza a alocação de RBG para as UEs com melhor condição de canal, levando a um compartilhamento de recursos injusto [13].

4) *Channel And Qos-Aware* (CQA): utiliza para alocação de recursos parâmetros de QoS como o atraso, perda e taxa (*Guaranteed Bit Rate*, GBR). O algoritmo atende requisitos de classes de tráfegos sensíveis a atraso, como voz e vídeo, que podem sofrer de qualidade ruim mesmo que exigências de GBR sejam satisfeitas. Dentro de um RBG, o CQA seleciona dentre todos os UEs aqueles que não receberam a taxa garantida e os agrupa pelo atraso HOL (*Head of Line*). Esse agrupamento é usado para priorizar a alocação de RBGs para os UEs mais urgentes, isto é, com maior valor de atraso HOL. O CQA ainda realiza uma maximização da capacidade do canal, atribuindo os recursos às UEs que podem utilizá-lo com melhor eficiência a partir das técnicas PF e o desvanecimento seletivo da frequência [14].

Kawser *et al.* [10] comparam o desempenho de dois escalonadores RR e PF, onde verificou-se que o PF apresentou melhor desempenho em diversos parâmetros como a taxa de transmissão, contudo o RR apresentou vantagem no atendimento de UEs que ficam mais distantes da eNodeB mesmo estes não possuindo altas taxas de dados. Esse estudo mostrou que o RR garante uma melhor justiça no atendimento dos UEs, porém o PF mantém um equilíbrio entre justiça e *throughput*.

Um algoritmo com o objetivo de melhorar a justiça na alocação de recursos e aumentar a eficiência espectral é proposta por Nsiri *et al.* [15]. Resultados de simulações mostram que o algoritmo proposto supera o desempenho dos escalonadores PF, MT e RR. Mushtaq *et al.* [16] propõem um escalonador com objetivo de preservar parâmetros de QoS e ao mesmo tempo reduzir o consumo de energia nas UEs. Os resultados mostram que o método proposto apresenta melhor consumo de energia e índice de justiça se comparado ao PF, RR e MT.

Um novo escalonador com o objetivo de atender aplicações de multimídia em tempo real foi proposto por Piro *et al.* [17]. O escalonador foi implementado em dois níveis. A camada superior utiliza uma abordagem baseada em teoria de controle linear de tempo discreto e na camada inferior foi usada uma variação do PF. Os resultados analíticos demonstram que o método proposto é capaz de fornecer serviços de tempo real e de melhor esforço. Simulações numéricas confirmaram os resultados analíticos, incluindo uma comparação de desempe-

nho entre diversos escalonadores considerando a qualidade de experiência observada pelo usuário final.

Liu e Chen [18] apresentam um escalonador para melhorar o desempenho de transmissão de vídeo no LTE. O método considera o atraso do pacote HOL, o tempo de transmissão de pacote de vídeo e a degradação da qualidade induzida pela troca de estação rádio base (*handoff*). Contudo, é muito difícil implementar este método na prática porque a eNodeB necessita decodificar o vídeo para identificar a estrutura de codificação de vídeo dentro da carga útil dos pacotes IP.

Outro método de escalonamento para aplicações de tempo real foi proposto por Lai e Tang [19]. O escalonador proposto utiliza o domínio da frequência e do tempo. Os RBGs são alocados às UEs no domínio da frequência de forma a atender os requisitos de taxa de transmissão. No domínio do tempo, os autores introduzem o conceito de fila virtual para prever o comportamento futuro da fila baseado na ocupação atual. Com esta previsão, a ordem de transmissão é alterada e os pacotes que não tem chance de cumprir seu requisito de atraso são descartados. Os resultados são comparados com o MT, PF e EXP-PF, e os resultados simulados indicam que o método proposto atinge melhor desempenho considerando o *goodput* e o atraso médio.

Uma estratégia para prover uma melhor qualidade de experiência para usuários de vídeo foi proposta por Essaili *et al.* [20], considerando um *streaming* adaptativo dinâmico sobre o *Hypertext Transfer Protocol* (DASH, *dynamic adaptive streaming over HTTP*). A estratégia proposta é um *playout buffer* dependente e que determina para cada cliente a taxa de *streaming* considerando as condições da RAN e qualidade de experiência (QoE, *quality of experience*) desejável. Os resultados simulados indicam o aumento no QoE em 35% para o pior caso, comparado com o original DASH.

A melhoria da QoE de vídeo *streaming* é também o objetivo do escalonador proposto por Ghalut *et al.* [21]. Neste caso, os autores empregaram um *framework* usando algoritmos genéticos e redes neurais. Resultados indicaram que o método melhorou o desempenho em comparação com outros métodos. O QoE é também utilizado por [22] no controle de usuários satisfeitos de vídeo *streaming* em LTE. Em [23] e [24] a satisfação dos usuários são avaliadas sobre LTE.

O problema para melhorar a justiça no compartilhamento de recursos entre UEs foi estudado por Regaleux *et al.* [25], no que mostra que a alocação de recursos em LTE-B é do tipo NP-completo e propõe o uso de algoritmos genéticos para otimizar uma variedade de objetivos, como maximizar a taxa de transmissão ou a justiça na distribuição de recursos. Resultados simulados mostram que o algoritmo proposto melhora o desempenho se comparado aos escalonadores PF e MT considerando a justiça e *throughput* máximo.

Para maiores detalhes, recomenda-se a leitura dos trabalhos de Capozzi *et al.* [13], que apresenta uma boa descrição dos algoritmos de escalonamento para *downlink*, e Najah *et al.* [26], que mostra uma descrição dos escalonadores de *uplink* em redes LTE. Contudo, nenhum dos trabalhos anteriores tem o objetivo de mitigar os efeitos do congestionamento e aumento do número de usuários satisfeitos de vídeo *streaming* em redes LTE. Este é o principal objetivo do escalonador

proposto.

III. UM NOVO ESCALONADOR

O escalonador proposto utiliza o CQI no escalonamento, mas não realiza reserva de recursos para fluxos específicos. O procedimento de escalonamento é ilustrado no fluxograma mostrado na Fig. 1. Primeiramente são alocados recursos para retransmissão de pacotes perdidos (*Hybrid Automatic Repeat Request*, HARQ) e para alocação semi-persistente (voz). A seguir, para cada RBG livre, verifica-se no buffer de entrada da eNodeB os UEs que devem receber dados no próximo TTI, ordena-os por ordem de CQI e realiza a alocação para as UEs com melhor qualidade de canal conforme a regra:

- 1) Se o *throughput* médio da UE não ultrapassou um certo limite, o RBG é alocado para a UE.
- 2) Caso contrário, seleciona a próxima UE com melhor qualidade de canal.

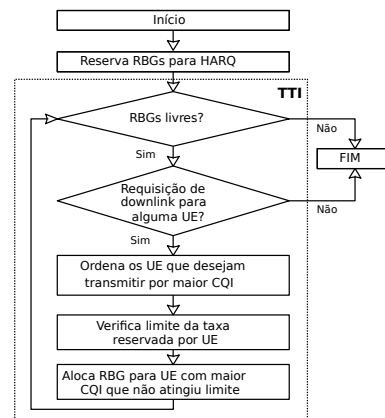


Fig. 1. Fluxograma de alocação dos RBGs.

O ordenamento por CQI tem o objetivo de dar prioridade às UEs que utilizam uma codificação mais eficiente, melhorando assim o número de UEs atendidos satisfatoriamente, uma vez que um UE com CQI baixo necessita de uma maior quantidade de RBGs para ser atendido com o mesmo *throughput* de um UE com CQI alto. O limite da taxa é definido previamente pelo operador do sistema.

Para estimar o *throughput* médio das UEs foi utilizada uma técnica de média móvel com alisamento exponencial simples, que possui uma complexidade computacional baixa. A cada TTI ou a cada alocação de RBG essa taxa é calculada a partir da Equação 1 a seguir:

$$R_i = \alpha \cdot r_i + (1 - \alpha) \cdot R_{i-1} \quad (1)$$

onde, i representa o número da UE, R_i é o *throughput* médio suavizado, r_i é o *throughput* instantâneo sendo alocado e α é o coeficiente de alisamento exponencial entre 0 a 1.

Quando a taxa reservada suavizada de um UE atinge o limite máximo definido ele deixa de receber recursos e a cada TTI o valor R_i é atualizado. Neste caso, o valor de r_i será zero e a respectiva taxa suavizada R_i irá decair até estar abaixo do limite e a UE se credenciar para receber recursos novamente. Essa abordagem faz com que um maior número de usuários

satisfeitos sejam atendidos, diferente dos demais escalonadores que buscam atender outras métricas, como a maximização da justiça na distribuição de recursos e do *throughput* geral ou a atribuição de recursos de QoS.

A. Avaliação de Desempenho

Para validação do escalonador proposto, foi utilizado o simulador de redes NS-3 (*Network Simulation*) com o módulo do projeto LENA [27] para simulações com LTE. O escalonador foi implementado na linguagem de programação C++ como um módulo do NS-3.

A topologia de simulação consiste na transmissão de vídeo e tráfego de fundo para UEs em uma rede LTE. Um fluxo de vídeo *streaming* é enviado do servidor para os UEs e um servidor de tráfego de fundo realiza a transmissão de pacotes com intervalos exponencialmente distribuídos e uma taxa média de 5 Mbps. Foram configurados dois cenários. No cenário 1 as UEs são posicionadas sempre a uma mesma distância da eNodeB e no cenário 2 as UEs são posicionadas de forma uniforme dentro de um raio pré-definido. Os parâmetros de simulação são sumarizados na Tabela I. A largura de banda usada foi de 10 MHz. As potências da eNodeB e UE são as de uso típico na prática. O modelo de perda usado é o Friis, onde a potência recebida decai proporcionalmente ao quadrado da distância do transmissor, a uma taxa de 20dB/década em relação à distância, e considera que há visada direta entre o transmissor e receptor. Esse modelo não é o mais realista para ambientes urbanos, mas isso não interfere na capacidade de generalização dos resultados, pois o parâmetro para a tomada de decisões é o valor do CQI. Desta forma, as distâncias utilizadas foram maiores do que as distâncias normalmente usadas em ambientes urbanos, com o objetivo de forçar uma variação no CQI.

TABELA I
PARÂMETROS UTILIZADOS.

Parâmetro	Valores utilizados
Largura de Banda	10MHz
Número de RBs	50
RBs por RBG	3
<i>downlink</i> EARFCN	100
Frequência Portadora <i>downlink</i>	2120 MHz
<i>Uplink</i> EARFCN	18100
Frequência portadora de <i>uplink</i>	1930 MHz
Modelo AMC e cálculo de CQI	Piro (2011)
Modelo de perdas	Friis
Potência de transmissão do eNodeB	30 dBm
Potência de transmissão dos UEs	10 dBm
Configuração das antenas	SISO
Taxa média servidor tráfego de fundo	5 Mbps
Coefficiente de suavização (α)	0,2

IV. RESULTADOS

No primeiro cenário de simulação as UEs foram posicionadas à uma mesma distância da eNodeB, tendo assim a mesma qualidade no canal. A taxa requerida para transmissão de vídeo era de cerca de 2,35 Mbps, com vídeo codificado com MPEG4 e qualidade 720p (HD). O limite de *throughput* foi configurado

em 3 Mbps no escalonador desenvolvido. Foi considerado um usuário satisfeito aquele possuir os requisitos mínimos para receber o vídeo: taxa média mínima de 2,350 Mbps, um atraso médio máximo de 200ms e *jitter* médio menor que 50 ms [28]. O número de UEs ativas na célula foi progressivamente aumentado e os resultados foram anotados.

Neste primeiro cenário, como observado na Tabela II, foram testados cinco diferentes combinações de quantidade de UE (4, 6, 8, 10 e 12) utilizando diversos escalonadores e comparando com o método proposto. É possível identificar que a uma distância de 150 metros o melhor número de usuários satisfeitos foi obtido pelo método proposto, o CQA e o PF. Para a distância de 3000 metros o método proposto apresentou melhor número de usuários satisfeitos em relação a todos os demais, seguido pelo CQA e PF. Nas distâncias de 6000 e 9000 metros, o método proposto se mostrou novamente superior ao oferecer maior número de usuários atendidos em relação aos demais escalonadores. Observa-se que o escalonador MT tende a atender um número pequeno de usuários. Isso ocorre devido a priorização de justiça no atendimento dos usuários mais distantes do eNodeB. Devido à distribuição dos recursos, os métodos RR e PF deixam de atender os requisitos exigidos pelo vídeo *streaming* quando em situações de maior congestionamento e pior qualidade do canal. Observa-se que o uso do método proposto apresenta melhores resultados, considerando o congestionamento e qualidade do canal.

TABELA II
NÚMERO DE USUÁRIOS SATISFEITOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA PARA O CENÁRIO 1.

Quant. UE	150 metros					3000 metros				
	CQA	MT	PF	RR	Proposta	CQA	MT	PF	RR	Proposta
4	4	3	4	4	4	4	3	4	4	4
6	6	3	6	6	6	6	3	6	6	6
8	8	3	8	8	8	8	3	8	0	8
10	10	3	10	0	10	10	3	10	0	8
12	12	3	12	0	12	0	3	0	0	8
Média	8	3	8	3,6	8	5,6	3	5,6	2	6,8
	6000 metros					9000 metros				
	CQA	MT	PF	RR	Proposta	CQA	MT	PF	RR	Proposta
4	4	2	4	4	4	0	2	0	0	2
6	6	2	0	0	4	0	2	0	0	3
8	0	2	0	0	5	0	2	0	0	3
10	0	2	0	0	5	0	2	0	0	4
12	0	2	0	0	5	0	2	0	0	4
Média	2	2	0,8	0,8	4,6	0	2	0	0	3,2

Em um segundo cenário os UEs foram distribuídos uniformemente em um raio de 10 km da eNodeB, com uma variação na quantidade de UEs entre 2 e 20. Foram realizados 18 rodadas de simulação com confiabilidade de 95%. Os resultados são apresentados na Tabela III. Pode ser observado que o escalonador proposto apresentou desempenho superior aos demais escalonadores, com aumento dos UEs atendidos com qualidade suficiente para vídeo *streaming*. No cenário com 2 e 4 UEs esse desempenho foi aproximadamente igual dentre os métodos testados, contudo a partir de 6 UEs o método proposto possui desempenho superior. O aumento das UEs ativas representa o aumento do congestionamento do sistema.

Observa-se que RR e o CQA praticamente deixam de atender os requisitos para transmissão de vídeo a partir de 6 UEs ativas. O escalonador MT consegue ainda atender algumas UEs com qualidade para transmissão de vídeo em situações de grande congestionamento. O escalonador proposto apresenta desempenho superior aos demais, principalmente quando a rede rádio atingiu maior congestionamento.

TABELA III
NÚMERO DE USUÁRIOS SATISFEITOS PARA O CENÁRIO 2.

UE	CQA	MT	PF	RR	Proposta
2	2±0	2±0	2±0	2±0	2±0
4	4±0	2,05±0,14	3,66±0,33	3,83±0,23	3,88±0,19
6	0,33±0,85	2,11±0,19	2,11±0,77	0,55±0,42	4,66±0,41
8	0±0	2,22±0,25	1,16±0,89	0,77±0,53	5,16±0,82
10	0±0	2,44±0,3	0,83±0,67	0±0	5,55±0,42
12	0±0	2,66±0,35	0,66±0,62	0±0	5,94±0,43
14	0±0	2,77±0,39	0,5±0,59	0±0	6±0,35
16	0±0	2,88±0,35	0±0	0±0	6,33±0,35
18	0±0	3,05±0,48	0±0	0±0	6,55±0,47
20	0±0	3,11±0,54	0±0	0±0	7±0,46

V. CONCLUSÕES

Com a nova proposta de escalonador de recursos em redes LTE, foi possível aumentar o número de usuários atendidos em aplicações de vídeo *streaming*, principalmente em situações de congestionamento da rede. Foi considerado nesta abordagem a distribuição dos recursos usando a qualidade de canal dos UE. Através de simulações, foi observado o aumento no número de UEs satisfeitos em diferentes cenários. Nos resultados, o método proposto se mostrou mais eficiente em relação aos algoritmos de escalonadores PF, RR, MT e CQA.

Como trabalho futuro é sugerido a avaliação da qualidade de experiência do vídeo recebido com a utilização de métodos subjetivos de avaliação. Também é proposto o uso de algoritmos *token bucket* para o controle da transmissão de pacotes de vídeo, e que ajuste a transmissão de dados a partir do comportamento da rede.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Vicente, V. Silva, J. Andrade, and G. Falcao, "Mobile 4K / 2K / HD Video Streaming Supported by Real-Time FEC RaptorQ Codes," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 405–411, November 2016.
- [2] E. Kim, H. Jeong, J. Yang, and M. Song, "Balancing Energy use Against Video Quality in Mobile Devices," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 517–524, August 2014.
- [3] CISCO, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016 to 2021 White Paper," February 09, 2017.
- [4] Z. Duanmu, K. Zeng, K. Ma, A. Rehman, and Z. Wang, "A Quality-of-Experience Index for Streaming Video," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 11, no. 1, pp. 154–166, February 2017.
- [5] E. LTE, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)(3GPP TS 36.300, version 8.11.0 Release 8), December 2009," p. v8.
- [6] T. Ali-Yahiya, *Understanding LTE and its Performance*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [7] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, "A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 10–21, June 2011.
- [8] J. Brown and J. Y. Khan, "Key Performance Aspects of an LTE FDD Based Smart Grid Communications Network," *Computer Communications*, vol. 36, no. 5, pp. 551–561, 2013.
- [9] N. Kumar, A. Ahmad, and D. Prasad, "Survey of Downlink Control Channel Resource Allocation Techniques in LTE," in *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, December 2015, pp. 1–5.
- [10] M. T. Kawser, M. Hasib, A. R. Hasin, A. M. Sadik, and I. K. Razu, "Performance Comparison Between Round Robin and Proportional Fair Scheduling Methods for LTE," *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 2, no. 5, p. 678, 2012.
- [11] R. Subramanian, P. Ghosal, S. Barua, S. Xing, S. Cong, H. Al Kim, and K. Sandrasegaran, "Survey of LTE Downlink Schedulers Algorithms in open Access Simulation Tools NS-3 and LTE-SIM," *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, vol. 7, no. 2, p. 1, 2015.
- [12] R. Kwan, C. Leung, and J. Zhang, "Proportional Fair Multiuser Scheduling in LTE," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 16, no. 6, pp. 461–464, June 2009.
- [13] F. Capozzi, G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda, "Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 15, no. 2, pp. 678–700, 2013.
- [14] B. Bojovic and N. Baldo, "A New Channel and QoS Aware Scheduler to Enhance the Capacity of Voice over LTE Systems," in *2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD14)*, February 2014, pp. 1–6.
- [15] B. Nsiri, N. Mallouki, S. Mhatli, M. Ghanbarisabagh, M. Ammar, and W. Hakimi, "Modeling and Performance Evaluation of Novel Scheduling Algorithm for Downlink LTE Cellular Network," *Wireless Personal Communications*, vol. 83, no. 3, pp. 2303–2316, 2015.
- [16] M. S. Mushtaq, S. Fowler, A. Mellouk, and B. Augustin, "QoS/QoS-Aware LTE Downlink Scheduler for VoIP With Power Saving," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 51, pp. 29–46, 2015.
- [17] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, R. Fortuna, and P. Camarda, "Two-Level Downlink Scheduling for Real-Time Multimedia Services in LTE Networks," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 13, no. 5, pp. 1052–1065, October 2011.
- [18] Q. Liu and C. W. Chen, "Smart Downlink Scheduling for Multimedia Streaming Over LTE Networks With Hard Handoff," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 25, no. 11, pp. 1815–1829, November 2015.
- [19] W. K. Lai and C.-L. Tang, "QoS-Aware Downlink Packet Scheduling for LTE Networks," *Computer Networks*, vol. 57, no. 7, pp. 1689–1698, 2013.
- [20] A. E. Essaili, D. Schroeder, E. Steinbach, D. Staehle, and M. Shehata, "QoS-Based Traffic and Resource Management for Adaptive HTTP Video Delivery in LTE," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 25, no. 6, pp. 988–1001, June 2015.
- [21] T. Ghalut, H. Larijani, and A. Shahrabi, "QoS-aware Optimization of Video Stream Downlink Scheduling Over LTE Networks Using RNNs and Genetic Algorithm," *Procedia Computer Science*, vol. 94, pp. 232–239, 2016.
- [22] M. Seyedbrahimi and X. H. Peng, "Ensuring QoE in Contemporary Mobile Networks for Video Content Distribution," in *2015 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, April 2015, pp. 233–238.
- [23] A. Li, Y. Sun, X. Xu, and X. Yang, "QoS-aware user satisfaction oriented joint resource block and power allocation in OFDMA systems with cloud based information sharing," in *2015 IEEE 16th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, October 2015, pp. 219–224.
- [24] U. Toseef, M. A. Khan, C. Görg, and A. Timm-Giel, "User Satisfaction Based Resource Allocation in Future Heterogeneous Wireless Networks," in *2011 Ninth Annual Communication Networks and Services Research Conference*, May 2011, pp. 217–223.
- [25] A. Ragaleux, S. Baey, and A. Fladenmuller, "An Efficient and Generic Downlink Resource Allocation Procedure for Pre-5G Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 16, no. 17, pp. 3089–3103, 2016.
- [26] N. Abu-Ali, A. E. M. Taha, M. Salah, and H. Hassanein, "Uplink Scheduling in LTE and LTE-Advanced: Tutorial, Survey and Evaluation Framework," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1239–1265, 2014.
- [27] N. Baldo, M. Miozzo, M. Requena-Esteso, and J. Nin-Guerrero, "An Open Source Product-Oriented LTE Network Simulator Based on NS-3," in *Proceedings of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. ACM, 2011, pp. 293–298.
- [28] T. Rahrer, R. Fiandra, S. Wright, and D. Allan, "Triple-play Services Quality of Experience (QoE) Requirements," in *DSL Forum TR-126*, vol. 2006, 2006.