

Escalonador de tráfego *downlink* com provisão de QoS para tráfego de vídeo em redes LTE

Fabian Maurice Malheiros Franco, Emilio Carlos Gomes Wille e Augusto Foronda

Resumo—A *Long Term Evolution* (LTE) é a principal tecnologia utilizada em redes 4G. Um de seus maiores desafios está relacionado ao uso do espectro de frequências e ao atendimento a serviços que exigem baixas latências. Considerando que o escalonamento de tráfego em redes LTE é um problema de otimização complexo, a principal contribuição do trabalho é uma nova arquitetura de escalonamento (*downlink*) com provisão de QoS para tráfego de vídeo.

Palavras-Chave—*Long Term Evolution* (LTE), escalonamento de recursos, qualidade de serviço (QoS), *downlink*.

Abstract—*Long Term Evolution* (LTE) is the main technology used in 4G networks. One of its major challenges is related to the use of the frequency spectrum and to services that require low latencies. Considering that the traffic scaling in LTE networks is a complex optimization problem, the main contribution of the work is a new *downlink* scheduling architecture with provision of QoS for video traffic.

Keywords— *Long Term Evolution* (LTE), resource allocation, quality of service (QoS), *downlink*.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de dispositivos móveis cresce ano a ano em todo o mundo e a quantidade de aparelhos já excede a população em muitos países. Com o aumento do número de aplicações de dados disponíveis por meio da Internet, aumenta também o número de assinaturas para utilização de rede de banda larga móvel [1]. Assim, as chamadas de voz, que eram a principal forma de tráfego utilizada em redes de telecomunicações móveis, perderam espaço para uma demanda por novos serviços. Agora, serviços como voz sobre IP, navegação web, vídeo-chamada e vídeo sob demanda, impõem novos desafios em relação à utilização de banda e latência para essas redes.

Novas tecnologias de comunicação são necessárias diante de um novo panorama de utilização de dispositivos móveis. Neste sentido, a atual tecnologia utilizada para implementação de redes de quarta geração, conhecida como *Long Term Evolution* (LTE) [2], busca apresentar uma experiência satisfatória ao usuário final. O surgimento de novas aplicações e as mudanças no comportamento do consumidor podem mudar os volumes de tráfego na rede. O *streaming* de vídeos em diferentes resoluções pode impactar o consumo de tráfego de dados em um alto grau. O vídeo de alta definição (1080p), geralmente aumenta o volume de tráfego de dados em torno de 4 vezes em relação ao mesmo vídeo com uma resolução padrão (480p). Uma tendência emergente com o aumento da transmissão de formatos de vídeo imersivos, como o vídeo de 360 graus, também afetaria o consumo de tráfego de dados. Por exemplo, um vídeo de 360 graus do YouTube consome 4 a 5

vezes mais largura de banda que um vídeo normal na mesma resolução [1].

A rede de acesso LTE tem como base um esquema de acesso múltiplo por divisão de frequências ortogonais (OFDMA - *orthogonal frequency-division multiple access*) e suporta uma ampla gama de serviços de multimídia e Internet, mesmo em cenários de alta mobilidade. Ela foi projetada para fornecer altas taxas de dados, baixa latência e uma eficiência espectral melhorada em relação às redes de gerações anteriores. Para alcançar esses objetivos, explora uma combinação de funções avançadas nas camadas MAC e física, como compartilhamento de recursos, relatórios de indicador de qualidade de canal, adaptação de links através de modulação e codificação adaptativa e pedido de retransmissão automatizado [3].

Um dos principais desafios para garantir Qualidade de Serviço (QoS - *quality of service*) em redes móveis de alta densidade e recursos limitados, está a cargo da disciplina de escalonamento. Neste sentido, o presente trabalho propõe um escalonador para tráfego de vídeo no sentido *downlink* para a arquitetura de rede LTE. A principal função deste escalonador é prover a garantia de um *delay* máximo para tráfegos de vídeo com taxa variável tratados por uma estação base. Para isso o escalonador proposto utiliza três etapas hierárquicas de processamento, além do conceito de servidores *Latency Rate* [4]. A etapa 1, tem a função de condicionar o tráfego de entrada; a etapa 2 tem a função de calcular uma taxa de transmissão para garantir um *delay* máximo requisitado; e, por fim, a etapa 3 faz a alocação do tráfego em blocos de recurso.

Este artigo está subdividido da seguinte forma. A Seção II mostra a arquitetura de rede para redes LTE. Na Seção III é apresentada a teoria de servidores *Latency Rate*. Na Seção IV são descritas a proposta e a formulação do problema. Na Seção V o ambiente de simulação e resultados. Por fim, a Seção VI apresenta as conclusões.

II. ARQUITETURA DA REDE LTE

A arquitetura de rede LTE é formada por componentes de controle, estações base e dispositivos móveis de usuários, conforme mostrado na Figura 1. A rede de acesso é formada apenas pela estação base eNodeB (*Evolved NodeB*), que pertence a E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) e fornece acesso por meio de uma rede sem fio ao equipamento do usuário (UE - *User Equipment*), o qual pode utilizar serviços de dados.

A eNodeB é responsável pela comunicação entre o UE e o *Evolved Packet Core* (EPC). O EPC é o núcleo da rede LTE e além de fornecer acesso aos serviços da rede externa, possui elementos responsáveis pelo controle de funções como autenticação, segurança, mobilidade, autorização de serviços,

endereçamento IP e roteamento. Igualmente, gerencia e armazena informações de registro e perfil do usuário [2].

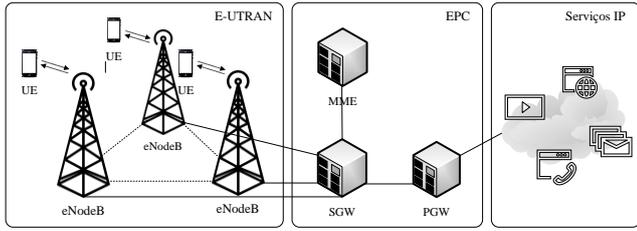


Fig. 1. Arquitetura de rede LTE.

Os componentes lógicos do EPC são descritos a seguir [2]:

- *Serving Gateway (SGW)*: Suas principais funções incluem o roteamento e encaminhamento de pacotes, assim como o suporte necessário para que os UEs se movimentem em áreas atendidas por diferentes eNodeBs;
- *Packet Data Network Gateway (PGW)*: Suas principais funções incluem o controle da troca de tráfego com a rede externa, seja ela a Internet ou um subsistema multimídia sobre IP, serviços de endereçamento IP e filtro de pacotes;
- *Mobility Management Entity (MME)*: Suas principais funções incluem as funções de sinalização e controle para gerenciar o acesso do UE às conexões de rede, como o registro de recursos de rede e a função de gerenciamento de mobilidade.

A E-UTRAN é formada por uma série de estações base eNodeB distribuídas de forma não hierárquica e geralmente conectadas entre si. A eNodeB é responsável pelo gerenciamento dos recursos de rádio, o que inclui o controle de portadora, controle de admissão, mobilidade de conexão e alocação de recursos para os UEs [2]. A alocação de recursos ocorre no sentido *uplink* para recepção de dados transmitidos pelo UE e no sentido *downlink* para transmissão de dados para o UE.

III. LATENCY RATE

A teoria de servidores *Latency Rate (LR)* é proposta em [4] e permite o cálculo de limites para o *delay* máximo em redes de comunicação de dados. A nomenclatura servidor é utilizada para retratar a combinação de um escalonador e um transmissor existente em uma porta de saída de uma estação base ou roteador. Estes servidores podem suportar diferentes disciplinas de escalonamento e diferentes modelos de tráfego. No caso de um escalonador LR, seu comportamento é determinado por dois parâmetros, a latência e a taxa alocada. Todos os servidores que garantem taxas aos seus clientes exibem essa propriedade e, portanto, podem ser modelados como servidores LR. A latência de um servidor LR pode ser considerada como o pior caso de *delay* do primeiro pacote no período ocupado por um fluxo.

O parâmetro de latência, em geral, depende do algoritmo de escalonamento utilizado, bem como da taxa alocada e dos parâmetros de tráfego da sessão que está sendo atendida. Para um algoritmo de escalonamento específico, parâmetros como a taxa de transmissão no link de saída, número de sessões que compartilham o link e as taxas atribuídas podem influenciar a latência.

Considerando $A_i(\tau, t)$ a representação para a chegada de dados da sessão i durante o intervalo de tempo (τ, t) e $W_i(\tau, t)$ a quantidade de serviço recebida pela sessão durante o mesmo intervalo. Assume-se então que $A_i(\tau, t)$ aumenta apenas quando o último bit de um pacote é recebido pelo servidor. Da mesma forma, $W_i(\tau, t)$ aumenta apenas quando o último bit do pacote

no serviço sai do servidor. Assim, considera-se um *delay* $Q_i(t)$ de uma sessão i no instante t dado pela equação:

$$\dot{Q}_i(t) = A_i(0, t) - W_i(0, t), \text{ se } Q_i(t) > 0. \quad (1)$$

Desta forma, o *delay* máximo de ponta a ponta experimentado por um pacote, pode ser calculado a partir das latências de k escalonadores em série e dos parâmetros de tráfego da sessão que gerou o pacote. Mais especificamente, se este tráfego for regulado por um balde de fichas, um *delay* D_i pode ser calculado pela equação:

$$D_i \leq \frac{\sigma_i}{\rho_i} + \sum_{j=1}^k \theta_i^{s_j} \quad (2)$$

onde σ_i e ρ_i são, respectivamente, parâmetros de tamanho máximo e taxa do balde de fichas e $\theta_i^{s_j}$ a latência do fluxo i no servidor S_j . Assim um escalonador de pacotes LR pode garantir um limite de *delay* $Dmax_i$ a partir de uma taxa de dados r_i , para um pacote de tamanho máximo $Lmax_i$, se o tráfego de entrada for regulado por um balde de fichas conforme mostra a Figura 2.

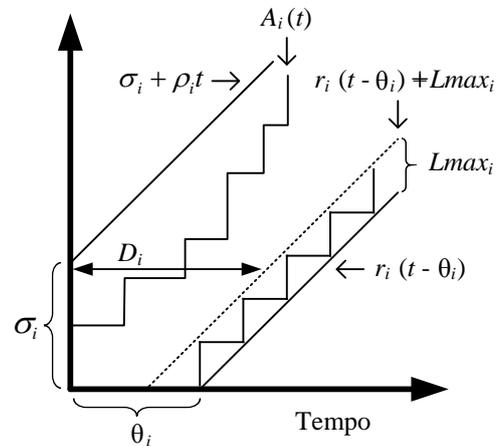


Fig. 2. Modelo do escalonador LR. Figura Adaptada de [4].

IV. PROPOSTA DE ESCALONAMENTO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A Qualidade de Serviço em uma rede LTE é ditada pelo método de escalonamento presente na eNodeB, o qual tem a função de selecionar os dados que serão transmitidos pelo meio físico a cada TTI (Transmission Time Interval) em atendimento às requisições de seus enlaces. A abordagem de escalonamento, as características de tráfego e a banda disponível para transmissão, são fatores determinantes para garantir qualidade nas transmissões de dados.

O modelo de escalonamento proposto neste trabalho visa atender a Qualidade de Serviço de transmissões individuais. Para isso, utiliza como base o modelo *Latency-Rate* em conjunto com um mecanismo de balde de fichas. Esta abordagem permite calcular limites restritos no atraso de ponta a ponta de sessões individuais. O atraso para a entrega de um pacote pode ocorrer por diversos fatores, sejam estes previsíveis ou não. Para este trabalho, considera-se o atraso decorrente do processo de escalonamento, que pode ser previsto e limitado mediante a aplicação do modelo proposto. Assim, utiliza-se como parâmetro de medição para a Qualidade de Serviço o atendimento a um atraso máximo para cada enlace concorrente em uma eNodeB.

A arquitetura do escalonador de recursos proposto para redes LTE é apresentada na Figura 3. A partir das requisições dos UEs, fontes de tráfegos encaminham dados para a rede de acesso E-UTRAN e um atraso máximo deve ser atendido para cada tipo de tráfego. Neste caso, o atraso máximo requerido para um tráfego é identificado por D_{max_i} e deve ser conhecido antecipadamente pela eNodeB. Quando os dados são recebidos na eNodeB, são armazenados no buffer da camada RLC (*Radio Link Control*) e submetidos a um algoritmo de balde de fichas. Em seguida, determina-se o tempo total (T_T) para a transmissão de todos os tráfegos, com base na configuração de banda da eNodeB e capacidade de recepção dos UEs. Assim, um cálculo é realizado para determinar a quantidade total de blocos de recursos (TRBG - *Total Resource Block Group*) a serem transmitidos no intervalo T_T . Este cálculo leva em conta a capacidade de transmissão por RBG (RBGmax) com base na informação do indicador de qualidade do canal (CQI - *Channel Quality Indication*). Finalmente, um módulo de alocação seleciona os tráfegos que serão encaminhados e os aloca em RBGs (*Resource Block Group*) no espaço tempo/frequência para a transmissão via interface de rede sem fio.

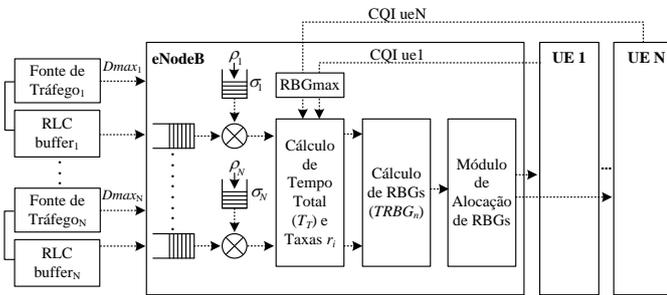


Fig. 3. Arquitetura do escalonador proposto.

O funcionamento do escalonador é determinado por dois parâmetros, são eles latência (θ_i) e taxa de transmissão (r_i). Neste modelo um algoritmo de balde de fichas limita o tráfego de entrada e o modelo LR provê uma taxa de alocação para um atraso máximo requerido. O tráfego de entrada recebido pela eNodeB é requisitado por um UE. A requisição, neste caso específico, é atendida por uma fonte de tráfego disponível na rede externa, a qual faz a transmissão de dados por meio do núcleo da rede LTE (EPC).

Conforme ilustra a Figura 4, a aplicação do modelo proposto pode ser segmentada em três etapas, onde a primeira etapa é a aplicação de um algoritmo de balde de fichas, a segunda se refere ao cálculo da taxa de transmissão (r_i) e tempo total (T_T) e a terceira ao módulo de alocação de RBGs. Dentre as etapas mencionadas, a segunda e a terceira referem-se especificamente à aplicação do modelo de escalonamento em redes LTE.

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Aplicação do algoritmo do balde de fichas	Cálculo da taxa de alocação	Cálculo de blocos de recursos

Fig. 4. Aplicação do modelo em etapas.

A. Etapa 1 – Aplicação do Balde de Fichas

Ao ser recebido pela eNodeB o tráfego de entrada $A_i(t)$ é remodelado, sendo limitado pelo tamanho e pela taxa do balde de fichas. Assim, a primeira etapa se refere ao tratamento do tráfego de entrada pelo mecanismo do balde de fichas e está sujeito a:

$$A_i(t) \leq \sigma_i + \rho_i, \quad (3)$$

onde σ_i corresponde ao tamanho do balde de fichas e ρ_i representa a taxa do balde de fichas no intervalo t para cada tráfego. Com a aplicação do balde de fichas para cada tráfego de entrada A_i temos um conjunto $\sigma_i + \rho_i$ distinto, o qual representa um limite máximo para o tráfego de entrada. O tamanho do balde de fichas deve comportar os dados recebidos a partir da fonte de tráfego e a taxa deve ser suficiente para encaminhar os dados sem que haja descarte de pacotes.

B. Etapa 2 – Atribuição de Tempo Total e Cálculo de Taxas de Alocação

Cada UE deve satisfazer às duas restrições quanto à taxa de transmissão, e, além disso, se as taxas de transmissão forem mínimas, um número maior de UEs poderão ser alocadas no espectro. Desta forma, neste trabalho, a Etapa 2 é formulada como um problema de otimização. O *Problema de Atribuição de Tempo Total (ATT)* tem por objetivo determinar o tempo total (T_T) que minimiza a somatória das taxas de transmissão (r_i) dos UEs. Seja N o número de UEs. O problema ATT é formulado da seguinte maneira:

$$r_{ATT} = \min_{T_T} \sum_{i \in N} r_i \quad (4)$$

sujeito a:

$$\rho_i + \frac{RBG \max_i}{T_T} \leq r_i, \quad i \in N \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_i - RBG \max_i}{D \max_i - \frac{RBG \max_i}{R} - T_T} + \frac{RBG \max_i}{T_T} \leq r_i, \quad i \in N \quad (6)$$

$$0 < T_T < D_i \quad (7)$$

A equação (4) é a função objetivo. As equações (5) e (6) correspondem às restrições quanto à taxa de transmissão das estações. A equação (7) é a restrição quanto ao tempo total para alocar todos os UEs com tráfegos ativos, onde $D_i = \min_{i \in N} D_{max_i}$. Observa-se que $r_{ATT} \leq R$, onde R é a taxa física do sistema. Sendo a função objetivo linear e o conjunto de restrições convexo, o problema ATT pode ser classificado com um problema de otimização convexa multi-variável restrito; a condição convexa garante a existência de uma única solução, ou seja, um ótimo global.

C. Etapa 3 – Alocação de Blocos de Recursos

Na arquitetura de rede LTE os serviços utilizados no sentido *downlink* geram fluxos de dados que são encaminhados do EPC para a eNodeB. Ao receber estes dados, o escalonador é encarregado de alocá-los em forma de RBGs. A configuração dos RBGs atende a definição de Alocação de Recursos Tipo 0 (*Resource Allocation Type 0*), a qual determina a quantidade de blocos por grupo em função da banda de passagem disponível para transmissão dos dados. Em seguida, os RBGs são alocados para o UE pela camada física, respeitando uma divisão por tempo e frequência definida nesta etapa por um módulo de alocação de recursos.

Inicialmente, a taxa r_i e o intervalo T_T calculados na Etapa 2 são convertidos em TRBG. Este valor representa a quantidade total de RBGs alocados para um UE em um intervalo T_T e é definido por:

$$TRBG_i = \frac{r_i}{RBG \max_i} \times T_T \quad (8)$$

onde $RBG_{max,i}$ representa a capacidade de transmissão em bits por RBG para o UE i . Tem-se então um conjunto de TRBGs distribuídos no domínio do tempo e frequência para o intervalo T_T que garante a taxa r_i e, por conseguinte, o atraso solicitado $D_{max,i}$.

Uma vez encontrado o conjunto de TRBGs, o processo de alocação, descrito no Algoritmo 1, é realizado de forma sequencial e cíclica visando promover justiça em relação ao atraso máximo para a entrega dos pacotes. A execução deste algoritmo ocorre até que todo o tráfego seja transmitido.

Algoritmo 1 Módulo de Alocação

Parâmetros do algoritmo:

S_{RBG} : Saldo RBG para alocação.

A_{RBG} : Alocação de RBGs contíguos para a iteração.

N_{UE} : Quantidade de UEs a serem alocados.

Dados de Entrada:

$CTRBG []$ = Conjunto de TRBGs.

Algoritmo:

1: TR = Identificar o menor TRBG no conjunto.

2: $S_{RBG,i}^{(0)} = 0$

3: **Para cada** iteração $i = 1$ até TR

4: **Para cada** UE $_i$ até N_{UE}

5: $A_{RBG,i}^{(n)} = \text{int} \left[\frac{TRBG_i}{TR} + S_{RBG,i}^{(n-1)} \right]$

6: $S_{RBG,i}^{(n)} = \text{mod} \left[\frac{TRBG_i}{TR} + S_{RBG,i}^{(n-1)} \right]$

7: Aloca $A_{RBG,n,i}$ para o UE selecionado

8: **Fim para cada**

9: **Fim para cada**

Retorno:

Alocação de UEs no espaço tempo/frequência para T_T .

A partir do conjunto de TRBGs, identifica-se entre os tráfegos solicitados o menor valor TRBG para alocação no tempo total T_T , ou seja, o que necessita menor quantidade de RBGs para transmissão. Este valor, identificado como TR , é utilizado como referência para a alocação de todos os tráfegos. Desta forma, para cada iteração do escalonador, todos os UEs tem seus dados alocados em RBGs e, para cada UE, é alocada uma quantidade de RBGs proporcional ao valor de TR . Assim, quando o valor $TRBG_i$ é igual ao valor de TR , 1 RBG é alocado para o UE selecionado, tendo em vista que a proporção será de 1:1.

A quantidade proporcional de RBGs alocada em cada iteração é identificada por A_{RBG} (RBG Alocado). Entretanto, deve-se considerar que a proporção pode resultar em valores não inteiros e para que a alocação seja feita de forma eficiente os RBGs devem ser ocupados por completo sempre que possível. Neste caso, os valores inteiros são alocados a cada iteração e, havendo tráfego na fila de transmissão, os valores decimais são atribuídos a um indicador de saldo $S_{RBG,i}^{(n)}$. Desse modo, a cada nova iteração, o saldo é incrementado com os valores não inteiros até que o seu valor seja igual ou maior que 1, isto é, que o saldo possa ocupar um RBG por completo. Não havendo mais tráfego na fila de transmissão, os dados do saldo são enviados na última iteração. Por fim, observa-se que o valor de TR corresponde também ao número de iterações necessárias para alocação de todos os RBGs no intervalo T_T , no entanto, o Algoritmo 1 é executado sempre que houver dados para transmissão.

V. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Considerando os fatores simplicidade, confiabilidade, documentação e customização, o Network Simulator 3 (ns3), versão 3.26, foi escolhido como instrumento para validar o modelo proposto. O ns3 é um simulador de eventos discretos para sistemas de rede, voltado principalmente para uso educacional e pesquisa, uma vez que aborda várias tecnologias de comunicação de dados tais como ethernet, LTE, Wi-Fi, WiMAX, entre outras. É um software livre escrito em C++ e está disponível publicamente sob a licença GNU GPLv2 para uso, pesquisa e desenvolvimento [5].

Os parâmetros utilizados para configuração do cenário de simulação são mostrados na Tabela 1. Estes parâmetros são configurados a partir do módulo LTE-EPC *Network Simulator* (LENA) [6].

TABELA I. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO NS3

eNodeB	1
UEs	30, 40, 50
eNodeB TX Power	46 dBm
Modelo de Atenuação	EPA 3km/h
Distância	500m
Tipo de Tráfego	Vídeo (VBR)
Quantidade de Tráfegos	2
Tempo de Simulação	30 s
Quantidade de simulações	50
Largura de Banda	5 MHz, 10 MHz, 15Mhz
MCS	28
RBs	25
Tamanho do RBG	2 RBs
TTI	1 ms
RB Bandwidth	180 kHz
Modulação	64QAM
Modo de Transmissão	FDD

O tráfego utilizado para a simulação foi adquirido de um vídeo com taxa de bits variável (VBR), gerado com base no *EvalVid* [7], um *framework* para a avaliação da qualidade de vídeo transmitido através de uma rede de comunicação real ou simulada. Para utilizá-lo no ns3 foi necessária a configuração do módulo *evalvid-ns3*, o qual possibilita a transmissão de vídeo a partir de um modelo cliente/servidor e está disponível em [8].

Tendo em vista a proposta do trabalho foram selecionados dois escalonadores para fins de comparação, *Round Robin* (RR) [9], devido a sua simplicidade e ampla utilização e *Channel And Qos-Aware* (CQA) [10], por possuir a particularidade que busca minimizar o *delay* na entrega de pacotes para tráfegos de voz e vídeo. Ambos possuem implementação no simulador ns3. Outros trabalhos relacionados como, por exemplo, os propostos em [11] e [12], possuem implementação em outros simuladores, tornando inviável a comparação de desempenho.

Para determinar o *delay* gerado no processo de escalonamento considera-se o intervalo de tempo que a eNodeB consome para entrega de um determinado pacote a um UE. Esta medição é feita pela análise dos dados do cabeçalho PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), considerando o pior caso, ou seja, considera-se o maior *delay* ocorrido em toda a transmissão para verificar se o *delay* requerido pelo UE foi atendido.

A. Delay Máximo

Nesta análise são considerados dois tráfegos VBR distintos. Ambos possuem tempo total de 30 segundos e taxas distintas. Uma UE atua com o tráfego 1, as demais (em número variável) atua com o tráfego 2. Na Etapa 2 o problema ATT foi resolvido com uso da função *fmincon* do MATLAB®.

A Figura 5 mostra que a partir da utilização do modelo proposto foi possível garantir o *delay* máximo solicitado para dois tráfegos de vídeo distintos. Os resultados de *delay* máximo para 1 UE com tráfego 1 e 49 UEs com tráfego 2, demonstram que o escalonador RR excedeu o limite de 150 ms em 81% e o escalonador CQA em 90%. Desta forma, nota-se que há uma vantagem expressiva do escalonador proposto em relação aos escalonadores RR e CQA na medida em que a densidade de UEs aumenta para 40 e 50 UEs e que o atendimento do *delay* máximo é suportado para os casos apresentados.

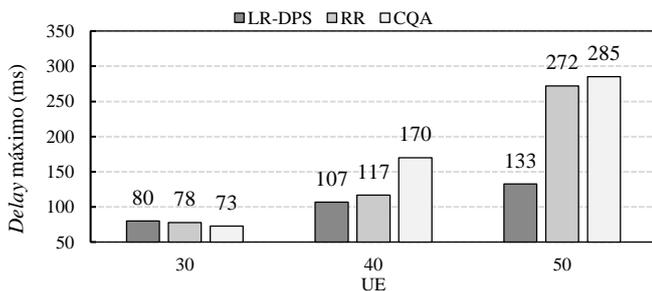


Fig. 5. Delay máximo para tráfegos de vídeo VBR.

B. Throughput Mínimo

Na Figura 6, nota-se que o escalonador proposto, assim como o escalonador RR, apresentam *throughput* mínimo com valores próximos a 123 kbps e 124 kbps para três densidades de UEs. Para o escalonador CQA verifica-se que o valor mínimo para 30 UEs fica em torno de 123 kbps e quando a densidade de UEs aumenta observa-se uma pequena queda do *throughput* para cerca de 119 kbps. Diante destes resultados, pode-se dizer que os três escalonadores não apresentam grande diferença de vazão mínima, quando comparados entre si e quando um escalonador é verificado com diferentes densidades de UEs.

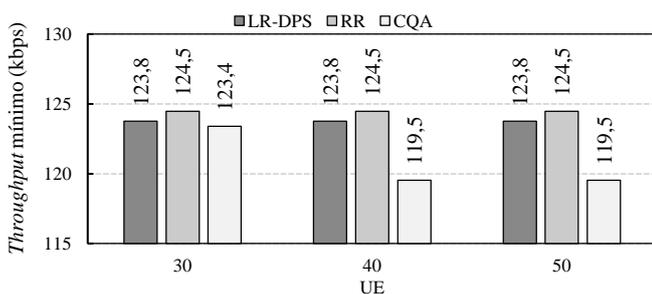


Fig. 6. Throughput mínimo para tráfegos de vídeo VBR.

C. Usuários Alocados

A partir dos resultados obtidos para diferentes larguras de banda é possível analisar os limites de usuários atendidos, levando em conta um *delay* de pico máximo de 150 ms para 5, 10 e 15 MHz. O gráfico da Figura 7 mostra que para as três

larguras de banda testadas o escalonador proposto alocou mais usuários em relação aos escalonadores RR e CQA.

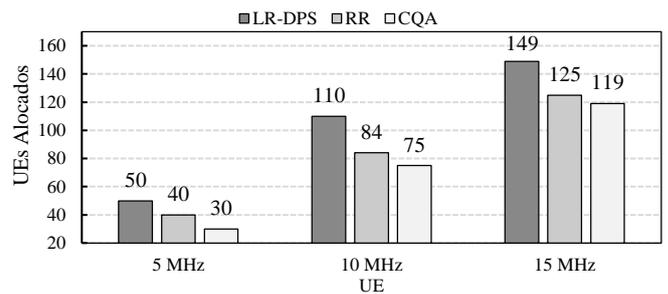


Fig. 7. Quantidade de UEs alocados em diferentes larguras de banda.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um modelo de escalonamento para redes LTE no sentido *downlink* com provisão de QoS para tráfego de vídeo com taxa variável. Os resultados mostraram que o modelo desenvolvido torna possível garantir um *delay* máximo para diferentes tráfegos de vídeo por meio da arquitetura proposta em três etapas. Outrossim, verifica-se que a arquitetura proposta alocou mais usuários em diferentes larguras de bandas.

REFERÊNCIAS

- [1] Ericsson, Ericsson Mobility Report, Tech. Rep. November, Ericsson (2017). [Online]. Disponível em: <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2017/ericsson-mobility-report-november-2017-central-and-eastern-europe.pdf>.
- [2] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, "LTE - the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice," 2nd Edition, Wiley, 2011.
- [3] 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," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 2, pp. 678-700, Second Quarter 2013. doi: 10.1109/SURV.2012.060912.00100.
- [4] D. Stiliadis and A. Varma, "Latency-Rate Servers: A General Model for Analysis of Traffic Scheduling Algorithms," IEEE-ACM Transactions on Networking, vol.5, pp.611-624, Oct. 1998.
- [5] Network Simulator 3 Homepage (2018, 15 Mar.). [Online]. Disponível em: <http://www.nsnam.org/>.
- [6] LTE-EPC Network Simulator (LENA), (2018, 15 Mar.). [Online]. Disponível em: <http://lena.ctc.es/manual/lte.html>.
- [7] Evalvid Framework (2018, 15 Mar.). [Online]. Disponível em: <http://www.tkn.tu-berlin.de/menu/research/evalvid/>.
- [8] NS3 Evalvid Module (2018, 15 Mar.). [Online]. Disponível em: <https://github.com/gercom/evalvid-ns3>.
- [9] J. B. Nagle. 1988. "On packet switches with infinite storage." In *Innovations in Internetworking*, C. Partridge (Ed.). Artech House, Inc., Norwood, MA, USA 136-139.
- [10] B. Bojovic and N. Baldo, "A new channel and QoS aware scheduler to enhance the capacity of voice over LTE systems," *2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14)*, Barcelona, 2014, pp. 1-6. doi: 10.1109/SSD.2014.6808890.
- [11] S. Ali and M. Zeeshan, "A utility based resource allocation scheme with delay scheduler for LTE service-class support," *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Shanghai, 2012, pp. 1450-1455. doi: 10.1109/WCNC.2012.6214009.
- [12] C. Wang and Y. C. Huang, "Delay-scheduler coupled throughput-fairness resource allocation algorithm in the long-term evolution wireless networks," in *IET Communications*, vol. 8, no. 17, pp. 3105-3112, 11 27 2014. doi: 10.1049/iet-com.2014.0167.