



UMA PROPOSTA DE ALGORITMO DE ESCALONAMENTO DOWNLINK PARA REDES LTE-ADVANCED

Márcio da Silva Maciel* e Paulo Roberto Guardieiro

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia-MG

Resumo - As aplicações de vídeo se popularizaram e demandam certos níveis de qualidade de serviço para que sua utilização proporcione a melhor qualidade de experiência possível. Nas redes *LTE-Advanced* (LTE-A), os escalonadores têm papel fundamental na alocação dos recursos de rede garantindo os níveis de satisfação e qualidade de serviço. Neste artigo é proposto um algoritmo de escalonamento no tráfego *downlink* para redes LTE-A utilizando *Carrier Aggregation* com objetivo de atender aos requisitos mínimos de qualidade de serviço das aplicações de videoconferência. Os resultados obtidos por meio de modelagem e simulação nos cenários avaliados demonstram que o objetivo deste trabalho foi alcançado.

Palavras-Chave - *Carrier Aggregation*, escalonamento *downlink*, qualidade de serviço, *LTE-Advanced*, ns3.

A DOWNLINK SCHEDULING ALGORITHM PROPOSE FOR LTE-ADVANCED NETWORKS

Abstract - The video applications have become popular and demand certain levels of quality of service, that its use afford the best possible quality of experience. In *LTE-Advanced* (LTE-A) networks, schedulers have fundamental work in allocation of network resources guaranteeing the levels of satisfaction and quality of service. In this paper is proposed a scheduling algorithm in *downlink* traffic for LTE-A networks using *Carrier Aggregation* with the objective of maintaining the minimum requirements of quality of service from the videoconference applications. The results obtained through modeling and simulation in the evaluated scenarios demonstrate that the objective of this work was achieved.

Keywords - *Carrier Aggregation*, *downlink* scheduling, quality of service, *LTE-Advanced*, ns3.

I. INTRODUÇÃO

De acordo com relatório recentemente publicado pela Cisco [1], até 2021, o tráfego de vídeo será responsável por 82% do tráfego global da Internet. Desde 2009, quando teve sua primeira versão lançada, as redes *Long Term Evolution* (LTE)

têm se tornado uma tecnologia predominante. Desenvolvida pela 3GPP, as redes LTE são totalmente baseadas em comutação de pacotes que permitem dar suporte a uma variedade de novos serviços e aplicações. Para atender requisitos definidos pela *International Telecommunication Union* (ITU) para *IMT-Advanced*, em 2010 a 3GPP submeteu o TR 36.912 [2], a nova versão foi denominada *LTE-Advanced* (LTE-A) [3]. Uma das principais características é o *Carrier Aggregation* (CA), que estendeu a capacidade de *Downlink* (DL) para até 1 Gbps e 500 Mbps para *Uplink* (UL). Esta característica é alcançada através da agregação de até 5 *Component Carriers* (CC) em uma mesma ou diferentes bandas de frequência, totalizando uma largura de banda de 100 MHz.

Existem outros aspectos da funcionalidade CA que podem ser estudados, dentre essas, a *Radio Resource Management* (RRM) em transmissões DL, incluindo a atribuição das CC, escalonamento, entre outras funções. *Radio Resource Control* (RRC) configura as CC de cada usuário com propósito de aumentar a taxa de transmissão ou melhorar as condições de transmissão do canal, enquanto o escalonamento tem como função alocar os *Resource Blocks* (RB) no domínio do tempo e frequência, bem como, determinar a *Modulation and Coding Scheme* (MCS) utilizada pelos *User Equipment* (UE) a cada *Transmission Time Interval* (TTI) [4].

Na literatura existente, diferentes trabalhos abordam o gerenciamento dos recursos de rádio em LTE-A. Khan et al. [5] propõem um algoritmo que prioriza as aplicações considerando os requisitos de atraso, e uma estratégia que adapta a taxa de transmissão utilizando CA. Em [6] é apresentado outro algoritmo que opera em conjunto com os canais UL e DL para distribuir, de forma justa, os recursos baseado no *QoS Class Identifier* (QCI). Os autores em [7] e [8] apresentam um cenário com CA *inter-band*, onde os usuários utilizam de múltiplas CC com diferentes bandas de frequências e variados modos de rádio propagação, e propõem um balanceamento de carga para CA *inter-band* visando um melhor desempenho em termos de cobertura. Liao et al. [4] apresenta um algoritmo para as redes LTE-A utilizando CA com o objetivo de maximizar a vazão de tráfego do sistema enquanto busca equidade na alocação dos recursos entre os usuários. De acordo com ele, formulou-se uma métrica usada para associar dinamicamente as CC e a MCS ao usuário, distribuindo os recursos de acordo com as melhores métricas dada a combinação de todas CC e MCS.

*marciosmaciel@gmail.com

A avaliação do algoritmo levou em consideração somente o tráfego com *buffer* infinito.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo propor um algoritmo baseado em Liao et al. [4] que atenda aos requisitos mínimos de *Quality of Service* (QoS) das aplicações de videoconferência. O algoritmo proposto utiliza-se de uma função de utilidade para priorizar os usuários considerando as seguintes métricas: o *QoS Class Identifier* (QCI) para classificar as aplicações, o *status* da fila de transmissão para minimizar o atraso na entrega dos pacotes e *Channel Quality Indicator* (CQI) usado para reportar a qualidade do canal. Como estratégia de seleção da CC, o algoritmo proposto consolida as métricas da função de utilidade para selecionar inicialmente as CC com as melhores taxas de transmissão e garantir de forma otimizada a taxa de transmissão requerida da aplicação.

Este artigo é organizado da seguinte forma. Na seção II, é apresentado uma visão geral de LTE/LTE-A, descrevendo a estrutura dos RB no tráfego DL, o gerenciamento dos recursos de rádio e CA. Na seção III é descrito o algoritmo proposto. Nas seções IV e V é apresentada a modelagem e simulação seguindo com a análise dos resultados. Finalmente, na seção VI são apresentadas as conclusões.

II. VISÃO GERAL - LTE/LTE-ADVANCED

A. Interface Aérea/Estrutura do Frame

As redes LTE e LTE-A usam OFDM como método de modulação na camada física, empregando OFDMA como o esquema de acesso múltiplo para o DL, e o *Single Carrier-FDMA* (SC-FDMA) para o UL. Tanto LTE e LTE-A suportam *Time Division Duplexing* (TDD) e *Frequency Division Duplexing* (FDD) como modos de multiplexação. Em FDD são utilizadas diferentes bandas de frequência para transmissões em DL, enquanto no TDD compartilham as mesmas bandas de frequência no DL e UL mas estão separados no tempo. As transmissões são organizadas em *frame*. Cada *frame* possui duração de 10 ms que são igualmente divididos em 10 *subframes* de 1 ms. Cada *subframe* é composto por dois *slots* de 0,5 ms. Cada *slot* corresponde a 7 ou 6 símbolos OFDM dependendo do tamanho do prefixo cíclico. A unidade de escalonamento é chamada de RB, que consiste do *slot* no domínio do tempo e 12 *sub-carriers* consecutivas no domínio da frequência. Cada *sub-carrier* tem 15 MHz de largura de banda. [9, 10].

B. Carrier Aggregation

Carrier Aggregation (CA) é uma das principais características do LTE-A, ela foi lançada na *Release 10* e sofreu melhorias nas versões posteriores. Essa característica permite que os usuários atinjam altas taxas de dados por meio de alocações concorrentes dos recursos de rádio utilizando mais de uma CC, além do aumento da utilização do espectro. Para permitir a compatibilidade entre os usuários LTE e a migração desses usuários para as redes LTE-A, cada CC é tratada como uma unidade distinta tendo seu identificador e sistema de informação próprio. Dessa forma, dispositivos sem CA podem alternar entre uma CC para outra através do *handover*. Por

outro lado, dispositivos com recursos de CA executam o *Random Access* (RA) na CC primária e opcionalmente permitem a configuração das outras CC que são chamadas de CC secundária [11]. CA pode ser utilizado em 3 diferentes cenários de espectro: *IntraBand Contiguous*, *IntraBand Non-Contiguous* e *InterBand Non-Contiguous*.

- *IntraBand Contiguous*: quando múltiplas CC são adjacentes dentro da mesma banda de frequência. Embora este cenário possa ser o menos provável, devido a distribuição de frequência pelas operadoras. Contudo, esse cenário pode ser mudado com a disponibilidade de novas bandas de frequência como 3,5 GHz.
- *IntraBand Non-Contiguous* : quando múltiplas CC dentro uma mesma banda de frequência são usadas de forma não contígua. Este cenário é esperado em países onde a alocação de espectro não é contígua ou quando o compartilhamento da rede é considerado.
- *InterBand Non-Contiguous* : Neste cenário encontra-se múltiplas CCs de diferentes bandas de frequência (ex.: 2 GHz e 800 MHz). Com este tipo de agregação, a mobilidade pode ser potencialmente melhorada explorando diferentes características de propagação de bandas diferentes, que conseqüentemente vai requerer uma complexidade adicional nas funcionalidade de radiofrequência do dispositivo móvel.

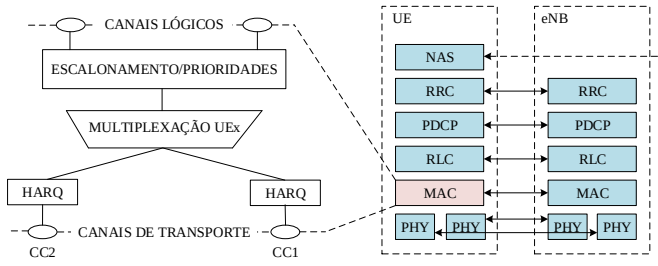
C. Radio Resource Management em LTE-A

O gerenciamento de recursos de rádio das redes LTE-A tem muita similaridade com as redes LTE. Primeiramente, o controle de admissão é executado pela eNB para decidir se novos UEs devem ser atendidos, em seguida são configurados os parâmetros de QoS para as respectivas *radio bears*. Uma nova funcionalidade foi introduzida com LTE-A e denominada como Configuração/Seleção de CC. Através da sinalização RRC, essa função define quais as CC o usuário será escalonado. Esse configuração é importante para o desempenho do sistema, bem como, o consumo de energia dos usuários [12].

Como os usuários LTE-A possuem múltiplas CC como mostrado na Figura 1, o escalonador pode utilizar dois métodos para alocação dos recursos [13]:

- *Escalonamento independente*: esse método é derivado do método convencional de escalonamento, que executa separadamente a alocação dos recursos entre as CC ativas. O escalonador em cada CC não tem conhecimento da situação dos usuários nas outras CC.
- *Escalonamento em conjunto*: esse método leva em consideração as estatísticas de todos usuários entre as CC ativas. A vazão do sistema nesse modo tem um desempenho melhor.

Figura 1: Estrutura de protocolos com CA baseado em [13]



III. ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo proposto baseia-se em um mecanismo que prioriza as aplicações de videoconferência garantindo a vazão de tráfego mínima requerida pela aplicação no tráfego DL. Dessa forma, o algoritmo proposto define uma função de utilidade para priorizar os usuários considerando as seguintes métricas: o QCI para classificar as aplicações, o *status* da fila de transmissão para minimizar o atraso na entrega dos pacotes e a MCS calculada a partir do CQI reportado pelo UE de acordo com a qualidade do canal [14]. Além disso, o algoritmo proposto utiliza-se da seleção dinâmica de CC baseado em Liao et al.[4] por apresentar melhor desempenho com relação aos outros algoritmos encontrados na literatura na questão vazão média de tráfego da rede. Por meio do escalonamento em conjunto, o algoritmo proposto maximiza-se a função de utilidade conforme a equação 3 que auxilia na seleção das CC. Dentro da CC, aloca-se os RB estimando a taxa alocada conforme a MCS selecionada e se encontra de acordo os requisitos mínimos de QoS. Na Tabela III são listados os símbolos usados no Algoritmo 1. A seguir, apresenta-se o algoritmo proposto que é executado a cada TTI:

Tabela I: Lista de símbolos usados no algoritmo

Símbolo	Definição
i	Índice do UE, $i \in \mathbf{M} := \{1, \dots, m\}$
j	Índice da CC, $j \in \mathbf{N} := \{1, \dots, n\}$
k	Índice do RB, $k \in \mathbf{P} := \{1, \dots, p\}$
l	Índice da MCS, $l \in \mathbf{Q} := \{1, \dots, q\}$
\mathbf{U}	Conjunto de UEs aptos a transmitir
\mathbf{B}	Conjunto de RB $_k$ associados a CC $_j$
$V(j, k)$	Taxa de transmissão que o UE atual está associado ao RB $_k$ da CC $_j$
$p(i, j, k, l)$	Matriz de prioridades do UE $_i$ na CC $_j$ usando RB $_k$ com a MCS $_l$
$r_{i,j,k,l}$	Taxa de transmissão do UE $_i$ associado a CC $_j$ no RB $_k$ usando a MCS $_l$
$c(i)$	Taxa de transmissão mínima da aplicação
$d(i)$	Atraso máximo da aplicação dentro dos requisitos de QoS
$g(i, j, k)$	Maior métrica do UE $_i$ na CC $_j$ usando RB $_k$
$Q_{i,j,k}$	Índice da maior MCS que o UE $_i$ pode utilizar
$v(i)$	Taxa total alocada do UE $_i$ entre as CC
$N_{i,j}$	Conjunto de RB em cada CC $_j$ associada ao UE $_i$.
$hol(i)$	Atraso do pacote na fila de transmissão da aplicação associada ao UE $_i$.
$D(i)$	Maior métrica de atraso da aplicação associada ao UE $_i$.

1. Define-se \mathbf{U} , o conjunto de todos os pares (i, j) , os UE $_i$ aptos a transmitir na CC $_j$ e \mathbf{B} conjunto de pares (j, k) , onde k é número de RB utilizado para transmitir na CC $_j$.
2. Seja $V(j, k)$ a taxa de transmissão que o UE atual está associado ao RB $_k$ da CC $_j$. Como encontra-se na etapa inicial e não existe nenhum RB de cada CC associado, atribui-se o valor zero.
3. Calcula-se $p(i, j, k, l)$, a matriz de prioridades do UE $_i$ na CC $_j$ usando RB $_k$ com a MCS $_l$. Deve-se maximizar essa equação para avaliar o UE com a maior métrica associado ao RB dentro de cada CC usando uma determinada MCS para transmitir.

$$p(i, j, k, l) = (1 - \alpha) \times \frac{r_{i,j,k,l}}{R_i(t-1)} \quad (1)$$

$$D(i) = \frac{hol(i)}{d(i)} \quad (2)$$

Onde $r_{i,j,k,l}$, é a taxa de transmissão do UE $_i$ associado a CC $_j$ no RB $_k$ usando a MCS $_l$, α é a prioridade da classe que varia entre 0,1 a 0,9 de acordo com a Tabela *QoS Class Identifier* (QCI) [15] e $R_i(t-1)$ é o *Throughput* médio do UE $_i$ calculado no TTI anterior.

4. Ao determinar a maior métrica maximizando a equação 1, é necessário avaliar o atraso dos pacotes na fila de transmissão em relação ao atraso máximo conforme os requisitos de QoS da aplicação, para isso deve-se também maximizar a equação 2. Dessa forma, condiciona aqueles UE que estão com os pacotes próximos a expirar.
5. Seleciona-se o UE $_i$ com a maior métrica da equação 1 condicionada a maior métrica da equação 2, ao qual será atribuído o RB $_k$ da CC $_j$, obtido por meio de $g(i, j, k)$ conforme equação 3.

$$g(i, j, k) = \max(p(i, j, k, l)) \rightarrow \max(D(i)), l \in Q_{i,j,k} \quad (3)$$

onde $Q_{i,j,k}$ é o índice da maior MCS que o UE $_i$ pode utilizar. Atribui-se a taxa de transmissão de $g(i, j, k)$ a $V(j, k)$.

6. Após a atribuição do RB $_k$, avalia-se a melhor MCS entre os RB alocados pelo UE $_i$ na CC Atual. Verifica-se o tipo da aplicação, caso seja uma aplicação com requisitos mínimos de QoS como videoconferência, calcula-se a taxa alocada do UE $_i$ entre as CC, conforme equação 4.

$$v(i) = \sum_{k \in N_{i,j}} \sum_{j=1}^n V(j, k) \quad (4)$$

onde $N_{i,j}$ é o conjunto de RB em cada CC associada ao UE $_i$. Obtém-se a taxa mínima da aplicação de videoconferência dada por $c(i)$. Se $v(i) > c(i)$, os recursos

alocados para o UE_{*i*}; atendem aos requisitos mínimos da aplicação. Com isso, o UE é retirado do conjunto **U** e não será mais escalonado no TTI atual.

7. Repita os passos 4 e 5 até que todos os RB de todas CC estejam alocados. Com todos usuários de aplicações de videoconferência atendidos, os recursos restantes são disponibilizados entre os usuários com aplicações elásticas.

Algoritmo 1: Algoritmo Proposto

```

U = {(i, j) | i ∈ M, j ∈ N}
B = {(j, k) | j ∈ N, k ∈ P}
para cada i ∈ M, j ∈ N, k ∈ P, l ∈ Q faça
    Calcular p(i, j, k, l)
fim
enquanto (B ≠ ∅) && (U ≠ ∅) faça
    para cada (i, j) ∈ M, l ∈ Qi,j,k faça
        Calcular g(i, j, k)
        V(j, k) ← ri,j,k,l
    fim
    { Aloca o RB k* da CC j* para U i* }
    { Remove (j, k) de B }
    para cada i ∈ M faça
        l' = max Qi,j,k k ∈ Ni,j
        { Associa MCS l' ao UE i para transmitir na CC }
    fim
    para cada j ∈ N, k ∈ Ni,j faça
        Calcular v(i)
    fim
    se v(i) > c(i) então
        { Atendeu os requisitos mínimos de QoS }
        { Remove todos pares que corresponde a U i* de U }
    fim
fim

```

IV. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Foram considerados dois cenários C1 e C2, cada um utilizando quatro CC de 10 MHz de largura de banda. No cenário C1 (*IntraBand Contiguous*), todas as CC operam dentro da faixa de frequência de 2 GHz, e no cenário C2 (*InterBand Non-Contiguous*) duas CC estão dentro da faixa de frequência de 2 GHz e as outras duas estão dentro faixas de frequência de 800 MHz. Cada cenário de rede consiste em uma eNB e *i* UE ativos. A eNB pode utilizar *j* CC para transmitir dados e cada UE pode usar até *n* CC.

Os UE são distribuídos aleatoriamente em uma área de cobertura de 420 x 420 m, e se movem de acordo com o modelo de mobilidade *Steady State Random Waypoint*[16]. Para permitir a experiência de diversos valores de MCS, foi inserido o modelo de perdas COST 231. O modelo *fading* empregado é o *Pedestrian EPA 3 km/h* simulado por meio de um arquivo *tracefile* previamente calculado para reduzir a complexidade computacional.

O tráfego DL é avaliado na simulação. Considera-se como tráfego de *background*, o tráfego gerado pelas seguintes aplicações: VoIP, Web e Vídeo. A aplicação VoIP gera fluxos padrão G.729. O tráfego da aplicação Web segue o modelo descrito em [17]. O tráfego de transmissão de vídeo em tempo real foi baseada no *Evalvid Framework*, muito usado para avaliar a qualidade de vídeo [18]. O vídeo é gerado numa taxa de transmissão de 1320 Kbps, conforme o H.264 durante 10s. A carga do tráfego foi dividida na seguinte proporção: 30% para Web, 20% para VoIP, 50% para vídeo. As aplicações são iniciadas em intervalos de 1 ms e o tempo total da simulação foi definido em 10s. A Tabela II apresenta outros detalhes.

Para avaliar o algoritmo proposto foi utilizado o simulador ns-3, versão 3.27 [19]. Outros parâmetros utilizados na simulação são mostrados na Tabela III.

Tabela II: Tipos de aplicações

Aplicação	QCI	Atraso máximo (s)
Voip	1	0,10
Vídeo	2	0,15
Web	9	0,30

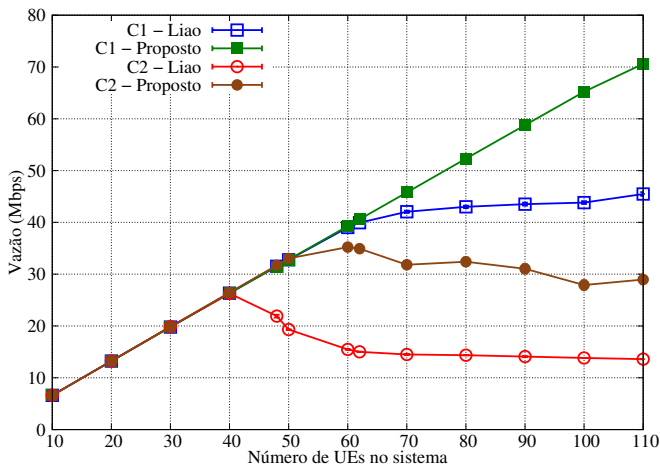
Tabela III: Parâmetros da simulação

Parâmetro	Valor
Modelo antena eNB	Isotrópica
Potência de transmissão eNB	46 dBm
Potência de transmissão UE	23 dBm
<i>Component Carriers</i>	4 x 10 MHz DL C1 {2GHz, 2GHz, 2GHz, 2GHz} C2 {800 MHz, 800 MHz, 2GHz, 2GHz}
Modo RLC	UM
Número de RBs por CC	50
Modelo AMC	Piro(2011)
<i>Fading</i>	Pedestrian EPA 3 km/h
Modelo de perdas	COST 231
Modelo de mobilidade	<i>Steady state random waypoint</i>
Número de UEs	10 a 110
Tempo de simulação	10s

V. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

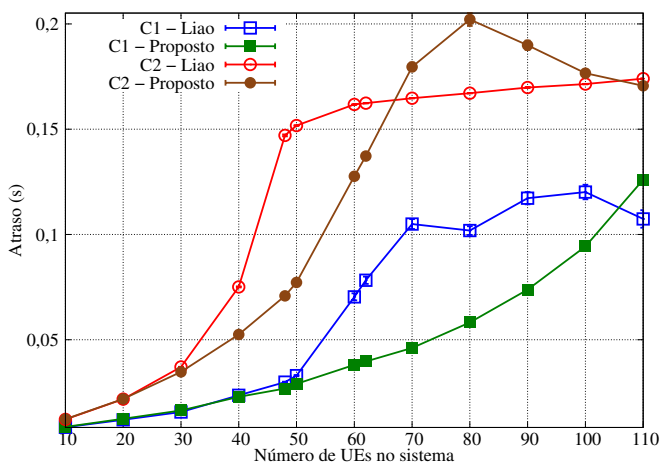
Nesta seção serão apresentados os resultados médios referentes a 50 rodadas de simulação, considerando um intervalo de confiança de 95%. A Figura 2 apresenta a vazão média do tráfego de videoconferência em função do número de UE no sistema para o tráfego de videoconferência. Nos dois cenários, o algoritmo proposto obteve melhor desempenho. Enquanto o algoritmo de Liao leva em consideração somente os UE com as melhores condições transmissão do canal alocando um RB em cada CC ativa, o algoritmo proposto prioriza os UE que executam as aplicações de videoconferência selecionando inicialmente as CC com as melhores taxas de transmissão e otimizando a alocação os recursos de acordo com a taxa de transmissão, com isso, a mesma taxa de transmissão requerida pode ser alcançada com um número menor de RB alocados por UE.

Figura 2: Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo



A Figura 3 apresenta o atraso médio do tráfego de videoconferência em função do número de UE no sistema para o tráfego de videoconferência. Foi implementado no escalonador o descarte de pacotes de acordo com os limites definidos na Tabela II. No cenário C1, os algoritmos atenderam aos requisitos de atraso impostos pelo tipo da aplicação. No cenário C2, o algoritmo proposto obteve melhor desempenho em relação ao outro, atendendo aos requisitos de atraso com 62 UE no sistema sendo 31 UE executando aplicações de videoconferência. Como o algoritmo de Liao sempre utiliza todas as CC para escalonar os recursos de cada UE em certos casos o atraso pode ser até menor em relação ao algoritmo proposto. Entretanto, não atende aos requisitos mínimos da aplicação tendo impacto na taxa de perda de pacotes como mostrado nos pontos 70, 80, 90 e 100 número de UEs no sistema.

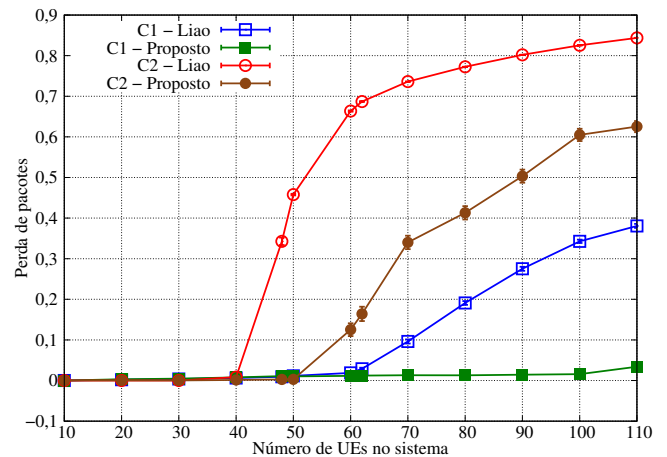
Figura 3: Atraso em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo



A Figura 4 mostra a perda de pacotes do tráfego de videoconferência em função do número de UE no sistema para o tráfego de videoconferência. Para garantir que o descarte dos pacotes seja relacionado somente ao atraso e não por *buffer* cheio, o tamanho do *buffer* dos *Radio Link Control* (RLC) dos UE foi definido em 1000 MB. Além disso, o algoritmo proposto ao alocar os recursos também considera o atraso do pacote na fila

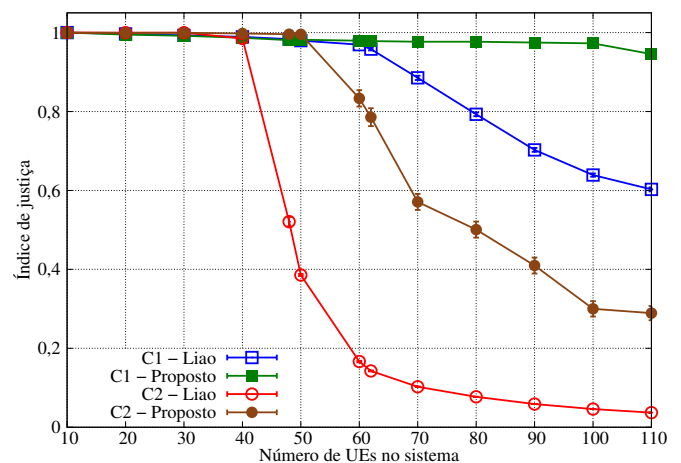
de transmissão do *buffer*. No cenário C1, o algoritmo proposto atendeu ao dobro de UE em comparação ao outro, tendo uma perda de pacotes na faixa de 1% para 100 UE no sistema, sendo que 50 são de aplicações de videoconferência. No cenário C2, o algoritmo proposto também obteve um desempenho melhor sendo superior a 50%, atendendo a 62 UE no sistema dentre esses 31 são aplicações de videoconferência. As CC que operam em altas frequências (2 GHz) podem sofrer com perdas mais significativas ao ultrapassar obstáculos em relação as CC de 800 MHz. Entretanto, o benefício é dar suporte a um maior número de usuários.

Figura 4: Perda de pacotes em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo



A Figura 5 apresenta o índice de justiça do tráfego de videoconferência em função da número de UE no sistema para o tráfego de videoconferência. Foi aplicado o *Jain Fairness Index* [20], essa métrica indica como o compartilhamento dos recursos de um mesmo tipo de aplicação estão sendo distribuídos de forma justa. O algoritmo proposto apresentou melhores resultados nos dois cenários. No cenário C1, o algoritmo proposto obteve melhor índice de justiça com 100 UE no sistema atendendo os requisitos das aplicações de videoconferência. No cenário C2, o melhor índice obtido atendendo os mesmos requisitos das aplicações de videoconferência foi com 62 UE no sistema.

Figura 5: Índice de justiça em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo



VI. CONCLUSÕES

Neste artigo propõem-se um algoritmo de escalonamento para as redes LTE-A com objetivo atender aos requisitos mínimos de QoS das aplicações de videoconferência. Por meio de uma função de utilidade priorizou as aplicações de videoconferência, considerando a qualidade das condições do canal e o atraso na fila de transmissão. Por meio da funcionalidade CA elaborou-se uma estratégia para selecionar as CC com melhores taxas de transmissão, alocando os recursos de acordo com a taxa de transmissão requerida das aplicações. Dessa forma, minimiza-se a sinalização entre as CC não selecionadas no TTI e disponibiliza recursos para outras aplicações de baixa prioridade. Considerando os cenários e as métricas utilizadas, os resultados apresentados por meio de simulações mostraram que o algoritmo proposto obteve um melhor desempenho quando comparado com a estratégia apresentada por Liao.

REFERÊNCIAS

- [1] Cisco, “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology.” Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>, 2017.
- [2] 3GPP, “Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced),” *TR 36.912*, 2011.
- [3] K. I. Pedersen, F. Frederiksen, C. Rosa, H. Nguyen, L. G. U. Garcia, and Y. Wang, “Carrier aggregation for LTE-advanced: Functionality and performance aspects,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 89–95, 2011.
- [4] H.-S. Liao, P.-Y. Chen, and W.-T. Chen, “An Efficient Downlink Radio Resource Allocation with Carrier Aggregation in LTE-Advanced Networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 10, pp. 2229–2239, 2014.
- [5] N. Khan and M. G. Martini, “QoE-driven multi-user scheduling and rate adaptation with reduced cross-layer signaling for scalable video streaming over LTE wireless systems,” *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2016, no. 1, 2016.
- [6] A. M. Ghaleb, E. Yaacoub, and A. A. Abdulkafi, “QoS-aware joint uplink-downlink scheduling in FDD LTE-Advanced with carrier aggregation,” *International Symposium on Wireless Communications Systems, ISWCS 2014 - Proceedings*, no. October, pp. 111–115, 2014.
- [7] H. Tian, S. Gao, J. Zhu, and L. Chen, “Improved component carrier selection method for non-continuous carrier aggregation in LTE-advanced systems,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2011.
- [8] H. Wang, C. Rosa, and K. Pedersen, “Performance analysis of downlink inter-band carrier aggregation in LTE-advanced,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2011.
- [9] 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 and Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1239–1265, 2014.
- [10] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2,” *TS 36.300*, 2015.
- [11] B. Bojovic, M. D. Abrignani, M. Miozzo, L. Giupponi, and N. Baldo, “Towards LTE-Advanced and LTE-A Pro Network Simulations,” pp. 63–70, 2017.
- [12] W. Miao, G. Min, Y. Jiang, X. Jin, and H. Wang, “QoS-aware resource allocation for LTE-A systems with carrier aggregation,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, vol. 2, pp. 1403–1408, 2014.
- [13] L. Liu, M. Li, J. Zhou, X. She, L. Chen, Y. Sagae, and M. Iwamura, “Component carrier management for carrier aggregation in LTE-advanced system,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 1–6, 2011.
- [14] 3GPP, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures,” *TS 36.213*, 2015.
- [15] 3GPP, “Policy and charging control architecture,” *TS 23.203*, 2010.
- [16] W. Navidi and T. Camp, “Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3, no. 1, pp. 99–108, 2004.
- [17] R. Pries, Z. Magyari, and P. Tran-Gia, “An HTTP web traffic model based on the top one million visited web pages,” *8th EURO-NF Conference on Next Generation Internet, NGI 2012 - Proceedings*, pp. 133–139, 2012.
- [18] “Evalvid Framework.” <http://www.tkn.tu-berlin.de/menue/research/%20evalvid/>, 2018.
- [19] “ns-3 simulator.” <https://www.nsnam.org/>, 2018.
- [20] R. Jain, D.-M. Chiu, and W. R. Hawe, “A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system,” *DEC technical report TR301*, vol. cs.NI/9809, no. DEC-TR-301, pp. 1–38, 1984.