Esquemas de escalonamento *QoS-aware* para enlace *Uplink* LTE-A em cenário de tráfego misto e redes heterogêneas

Itagildo E. Garbazza e Paulo R. Guardieiro

***Resumo*— Aplicações de videochamada estão cada vez mais comuns em redes móveis celulares. Assim, neste artigo é proposto um esquema de alocação de recursos que prioriza o tráfego de videochamadas em ambiente de rede heterogênea, com a presença de nós de repetição. O esquema de alocação proposto foi avaliado por meio de modelagem e simulação. Os resultados das simulações demonstraram que o esquema de alocação proposto obteve vazão de modo a atender este requisito para aplicações de videochamada.**

***Palavras-Chave*— Escalonador, *Uplink*, LTE-A, Videochamada.**

***Abstract*— Video call applications are increasingly common on mobile cellular networks. Thus, this article proposes a resource allocation scheme that prioritizes video call traffic in a heterogeneous network environment, with the presence of relay nodes. The proposed allocation scheme was evaluated using modeling and simulation. The results of the simulations demonstrated that the proposed allocation scheme obtained throughput in order to meet this requirement for video call applications.**

***Keywords*— Scheduler, Uplink, LTE-A, Video call.**

I. Introdução

Redes móveis heterogêneas tem sido objeto de estudos de diversos pesquisadores nas últimas décadas, buscando aumentar a capacidade do sistema, ampliar a cobertura da rede, melhorar o gerenciamento de interferência e oferecer garantia da qualidade de serviço.

Focando a atenção nestas tecnologias é importante conhecer tanto suas possibilidades quanto limitações, objetivando prevenir eventos de saturação, desenvolver mecanismos de otimização, garantir qualidade na comunicação e permitir a redução dos custos de implementação.

Segundo [1] o investimento em redes LTE-A (do inglês, *Long Term Evolution-Advanced*) continuam atraindo a atenção dos grandes operadores. Ainda conforme [1] o maior volume de tráfego em redes móveis será composto por vídeo e transmissão de dados, mas já apresenta um crescimento de tráfego a automação industrial e outra conhecida como cidades inteligentes (*smart cities*).

Assim, um dos principais desafios enfrentados em redes móveis é fornecer alto rendimento na borda da célula. E uma solução para melhorar a cobertura da rede é o uso de Nós de Retransmissão (RN, do inglês *Relays Nodes*) [2] que consistem em uma infraestrutura sem conexão com fio, que retransmitem mensagens entre a estação base (eNodeB, do inglês *evolved nodeB*) e os equipamentos de usuários (UE, do inglês *User Equipment*) por meio da comunicação *multihop* [3]. A utilização de RN permite melhorar o rendimento da rede, distribuir melhor os recursos e também expandir a área de cobertura da célula [4].

Outro grande desafio é a distribuição dos recursos de rádio (RB, do inglês *Resource Block*) aos UE visando atender requisitos de qualidade de serviço. O escalonador é responsável por gerenciar esses limitados recursos de forma a maximizar o desempenho dos sistemas. No LTE-A o escalonador está localizado na eNodeB [5]. A forma como o escalonador trata as condições da rede determinam diretamente a qualidade da distribuição de recursos. No *uplink* o escalonamento requer especial atenção, visto que além das condições de escalonamento já existentes no *downlink* é necessário considerar itens específicos, como a potência de transmissão do UE.

A implementação do escalonador não é especificada pelo *Third Generation Partnership Project* (3GPP), permitindo que cada fabricante realize sua própria implementação, utilizando diferentes critérios para a alocação de recursos. De acordo com o 3GPP, o escalonamento pode ser projetado para assumir um ou mais objetivos, incluindo: maximizar a eficiência espectral; maximizar o *throughput* total da rede; minimizar interferência celular; ou manter os limites/métricas de justiça específicos [6].

Este artigo apresenta uma proposta de esquema de alocação de recursos que busca garantir o desempenho de usuários com aplicações de videochamada num ambiente de tráfego misto e rede heterogênea, formada por RN.

O restante deste artigo está assim organizado: na Seção II é apresentado o escalonamento em redes LTE-A, abordando especificamente o *uplink*. A definição do problema está na Seção III, juntamente com a proposta de um novo esquema de alocação de recursos. Os critérios de simulação utilizados são apresentados na Seção IV. Na Seção V são apresentados os resultados da simulação e comparação de desempenho do esquema proposto. Por último, na Seção VI são apresentadas conclusões e propostas de trabalhos futuros.

II. Redes LTE-A

O LTE-A conta com várias melhorias, como: agregação de portadora; MIMO (do inglês *Multiple-Input and Multiple-Output*) multiusuário; femto-células; escalonamento inteli-

Os autores estão vinculados ao Grupo de Pesquisa em Redes de Computadores da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia-MG, Brasil. E-mails: prguardieiro@ufu.br. Itagildo E. Garbazza é vinculado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG). E-mail: itagildo.garbazza@ifmg.edu.br

gente de UE, em função dos estados instantâneos do canal; gerenciamento de interferência; e controle de admissão [6].

O LTE-A utiliza o SC-FDMA como esquema de transmissão para o *uplink*, e o OFDMA para o tráfego *downlink*. O SC-FDMA divide o espectro de transmissão em múltiplas subportadoras em paralelo e foi escolhido para o tráfego *uplink* por apresentar uma menor Razão de Potência de Pico para Média (PAPR, do inglês *Peak-to-Average Power-Ratio*) [7]. Uma PAPR baixa aumenta a eficiência em relação ao consumo de energia dos UE durante a transmissão [8].

A unidade básica de troca de informações do usuário, tanto no *downlink* quanto no *uplink*, do sistema LTE-A são os RB [6]. Cada RB é dividido em 12 subportadoras com espaçamento de 15 KHz no domínio da frequência, totalizando 180KHz de largura de banda total. No domínio do tempo, um RB possui duração de 0,5ms (um *slot*). A eNodeB é responsável pela alocação de RB aos UE, obedecendo as regras de escalonamento [9].

O escalonamento é o processo que realiza a alocação de recursos para os UE de forma dinâmica e o responsável por essa tarefa é o escalonador, que faz parte da camada MAC na eNodeB [6]. Um dos fatores que interferem na alocação de recursos para os UE é a qualidade do link entre UE e eNodeB, definindo características das transmissões, como taxa de dados alcançável, formato de transmissão, dentre outros [10]. Encontrar alocações ideais de recursos é uma tarefa complexa, portanto, escalonadores de baixa complexidade são preferidos, uma vez que essa tarefa deve ser realizada a cada 1ms [9]. E este intervalo de tempo é definido como Intervalo de Tempo de Transmissão (TTI, do inglês *Transmission Time Interval*) [6]. A quantidade de RB em um TTI é variável em função da largura de banda do canal utilizado [5]. A Figura 1 apresenta um esquema geral de alocação de recursos.

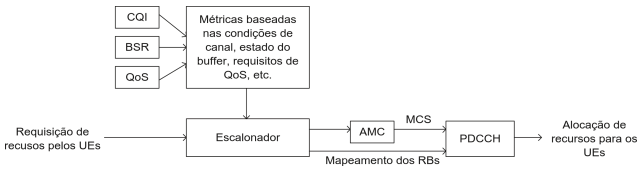

Fig. 1. Esquema geral de alocação de recursos. [11]

O esquema de modulação e codificação (MCS, do inglês *Modulation and Coding Scheme*) define a quantidade de bits que pode ser transportada em um RB. MCS de ordem mais alta permitem que o RB transporte mais dados, porém aumenta a exigência com relação à melhores condições de canal entre UE e eNodeB [8]. Para definir o MCS adequado, cada UE deve enviar à eNodeB o Indicador de Qualidade do Canal (CQI, do inglês *Channel Quality Indicator*), que indica a qualidade do canal em cada TTI [12].

Redes LTE-A fazem uso de esquemas de modulação e codificação adaptativos (AMC, do inglês *Adaptive Modulation and Coding*) permitindo aumentar a capacidade de tráfego da rede. O AMC tem a função de ajustar a ordem da modulação e a taxa de código através dos CQI enviados periodicamente pelo UE, buscando selecionar o melhor MCS e minimizar a taxa de erros [13].

O uso eficiente desses recursos de rádio é essencial para atender às metas de desempenho do sistema e satisfazer as necessidades do usuário de acordo com requisitos específicos de Qualidade de Serviço (QoS, do inglês *Quality of Service*) [14].

Para garantia de QoS, o sistema LTE-A trabalha com fluxos de dados conhecidos como *bearer*, transmissão orientada por conexão, criando um túnel entre transmissor e receptor [14]. Neste artigo, são tratados dois tipos específicos de *bearers*: com taxa de bits garantida (GBR, do inglês *Guaranteed bit-rate*) e sem taxas de bits garantida (não-GBR). A *bearer* GBR por possuir taxa de bits garantida, minimiza a perda de pacotes em caso de congestionamento da rede. Já numa *bearer* não-GBR a possibilidade de perda de pacotes em caso de congestionamento aumenta consideravelmente, por não ter taxa de bits garantida. O Identificador de Classe de QoS (QCI, do inglês *QoS Class Itendifier*) será utilizado para distinguir tráfegos GBR, oferecendo prioridade de escalonamento ao tráfego de videochamada. As especificações de cada QCI, como tipo de *bearer*, prioridade, atraso de pacote, limite de perda de pacote e exemplos de serviços, pode ser encontrado em [15].

A. Nós de Retransmissão

UE localizados em ambientes internos ou na borda da célula podem não receber intensidade de sinal suficiente para que obtenham altas taxas de dados. Para resolver esse problema pode-se utilizar os RN, pois são uma solução simples de instalar e economicamente viável [16].

Os RN são estações base de baixa potência que permitem maior cobertura e capacidade nas bordas das células. Basicamente um RN se comporta como uma eNodeB comum do posto de vista do UE. A eNodeB que se comunica com um RN é chamada de eNodeB doadora (DeNodeB, do inglês *Donor* eNodeB).

A Figura 2 mostra a comunicação de um RN com uma eNodeB através da interface de rádio. Os UE podem se conectar diretamente a um eNodeB ou indiretamente através de um RN. Numa rede heterogênea os UE na borda da célula são atendidos pelo RN. As frequências usadas na comunicação direta e na comunicação indireta podem ser idênticas ou diferentes. No caso de se usar frequências idênticas para ambas as comunicações (direta e indireta) existe a possibilidade de interferência entre RN/eNodeB. A comunicação entre RN e eNodeB é identificado por *link* de *Backhaul*.

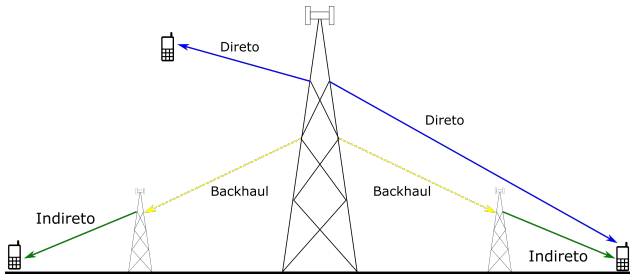

Fig. 2. Modelo de rede RN. Adaptado de [17] e [4]

A adoção de RN em redes LTE-A tem por objetivo melhorar a relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal to Noise Ratio*) para UE localizados nas bordas das células, aumentar a área de cobertura das células, reduzir os custos de implantação do sistema e cobrir as regiões que apresentem níveis baixos de sinal.

Basicamente, os RN podem ser classificados em duas categorias: Tipo 1 e Tipo 2. Os RN Tipo 1 operam em uma arquitetura de Camada 3, gerenciando sua própria célula (símbolos de sinalização, sincronização e referência) e executando escalonamento descentralizado. Por sua vez, os RN Tipo 2 operam nas arquiteturas da Camada 1 ou na Camada 2 (dependendo da funcionalidade da camada MAC). Os RN Camada 1 são responsáveis apenas por receber, amplificar e retransmitir o sinal recebido. RN com arquitetura de Camada 2 devem receber, decodificar e retransmitir o sinal recebido [17]. Portanto, os RN Tipo 2 não conseguem gerenciar o escalonamento, contando com a DeNodeB para essa finalidade.

III. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo é priorizar, no escalonamento *uplink*, os UE com tráfego de videochamadas num cenário de célula única em rede 3GPP LTE-A com a presença de nós de repetição. Para isso, um novo esquema de alocação de recursos é proposto.

O processo de escalonamento para alocação de recursos será modelado através da função utilidade U. Seja n a quantidade de UE a serem escalonados e m a quantidade de RB disponíveis para escalonamento. O objetivo é maximizar a função utilidade U.

$$\begin{array}{rl} Maximizar & U = d(n,m) \\ \text{Sujeito a:} & \sum_{i=1}^{n} \omega(i,m) \leq 1 \\ & \sum_{j=1}^{m} \omega(n,j) P_{TX}(n) \leq 23dBm \end{array} \tag{1}$$

em que $d(n,m)$ indica que o RB_m está alocado para UE_n; ω(i,m) indica se o RB_m foi escalonado para o UE_i recebendo valor 1, ou o valor 0 caso não tenha sido escalonado. $P_{TX}(n)$ indica a potência utilizada pelo UE_n durante a transmissão em cada TTI.

O processo de alocação de recursos deve obedecer algumas restrições para garantir a eficácia do sistema. As restrições utilizadas para o desenvolvimento do esquema de alocação proposto são apresentadas a seguir.

A. Restrição de Contiguidade

O SC-FDMA possui dois tipos de mapeamento de subportadoras, o Localizado (LFDMA, do inglês *Localized FDMA*) e o Entrelaçado (IFDMA, do inglês *Interleaved FDMA*). Conforme [18], para o escalonamento *uplink*, o LFDMA apresenta maior rendimento que o IFDMA, possuindo desempenho similar em termos de PAPR. A alocação de RB contíguos aos UE é denominada restrição de contiguidade, sendo utilizada no projeto do esquema de alocação proposto, assim como na maioria da literatura analisada.

B. Potência Máxima de Transmissão

Conforme definido pelo 3GPP [3], o limite máximo de potência de transmissão no *uplink* é de 23 dBm por UE de classe 3.

C. Seleção dos UE

Durante o processo de escalonamento de cada um dos RB define-se um vetor de UE, que será utilizado para a seleção do UE a ser escalonado. As características desse vetor são definidas pelas equações a seguir:

$$\delta = \lfloor N_{UE} \times \beta \rfloor \tag{2}$$

$$\phi = \lfloor \delta \times \gamma \rfloor \tag{3}$$

em que δ representa o tamanho total do vetor de UE e ϕ a quantidade de UE com tráfego de videochamada dentro do vetor δ. Os parâmetros β e γ podem ser ajustados no esquema de alocação proposto.

O vetor δ conterá os ϕ UE com tráfego de videochamada com maiores níveis de relação sinal-ruído-interferência (SINR, do inglês *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) para o RB atual e os $\delta - \phi$ UE com outros tipos de tráfego, também com os maiores SINR. Para escolha do UE a ser escalonado foi utilizado o Método de Seleção por Roleta [19]. A proporção que os UE com tipo de tráfego a ser priorizado ocuparão na roleta é definida pelo parâmetro θ. Assim cada UE será proporcionalmente representado na roleta conforme as equações 4 (para UE com tráfego de videochamada) e 5 (para os demais UE).

$$Prop_{pri} = \frac{\theta}{\phi} \tag{4}$$

$$Prop_{outros} = \frac{1-\theta}{\delta - \phi} \tag{5}$$

D. Conexão dos UE

Os UE foram posicionados aleatoriamente na área da célula. Cada UE é conectado à eNodeB ou ao RN com base no nível de SNR. Os UE conectados à eNodeB são identificados como UE diretos e os UE conectados a um RN são identificados como UE indiretos.

E. Configuração da Célula

A rede foi configurada numa célula com um raio de 1400m, tendo uma eNodeB ao centro e os UE distribuídos de forma aleatória em torno da eNodeB. Foram instalados 04 (quatro) RN à 1100m do centro da célula. Cada RN possui dois conjuntos de antenas, uma antena direcional para comunicação com a eNodeB e uma omnidirecional para comunicação com os UE. A Figura 3 apresenta a topologia utilizada para a simulação, adaptado de [20].

A eNodeB, através do esquema de alocação proposto, deverá alocar os recursos disponíveis à cada UE, priorizando aqueles com conexão ativa de videochamada no *uplink*.

A distância do UE à eNodeB/RN impacta no desempenho da conexão e também no desempenho geral da célula. Assim, para realizar uma comparação justa entre os escalonadores, foi utilizada a mesma distribuição espacial dos UE em todas as simulações.

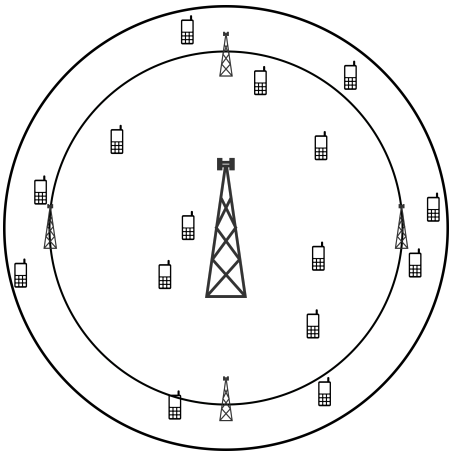

Fig. 3. Topologia de rede utilizada na simulação

IV. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

A implementação e a simulação do esquema de alocação de recursos proposto foram realizadas no simulador *Vienna LTE-A Uplink Link Level Simulator* desenvolvido pelo *Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology* [21], modificado conforme as necessidades da simulação.

Na simulação foram assumidas as seguintes condições: 50% (cinquenta por cento) dos UE possuem tráfego de videochamada; todos os UE possuem apenas uma classe de tráfego e mantém esse fluxo até a conclusão da simulação; retransmissões de bloco de dados com erro (HARQ) não são consideradas; *buffers* dos UE, dos RN e da eNodeB possuem capacidade ilimitada de armazenamento; vazão mínima de 384Kbps (Kilobits por segundo) esperada para UE com tráfego de videochamada [22].

Os parâmetros de simulação utilizados estão listados na Tabela I e foram baseados em [9] e [20].

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.

Parâmetro	Valor
Layout	Célula Única com antena omnidirecional (1x1)
Tempo de simulação	500 TTI
Largura de Banda	5 Mhz
Matriz de recursos	25RB x 2 *slot*
Número de UE	20, 30, 40 e 50
Atraso de *Feedback*	0 TTI
Tipo de Receptor	*Zero Forcing (ZF)*
Duração TTI	1ms
Modelo de Canal	PedA
Estimação de Canal	*PERFECT*
Esquema de escalonamento	MT, RR e Esquema Proposto

Como o escopo deste trabalho é comparar o desempenho do esquema de alocação proposto em relação à esquemas clássicos, a utilização de uma topologia com cenário 1x1 é adequada.

Os valores de 0,8; 0,34 e 0,7 para os termos θ, β e γ , respectivamente, foram identificados como adequados para os cenários desta simulação.

V. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Uma avaliação quantitativa de desempenho do esquema de alocação de recursos proposto será apresentada, comparando com esquemas já consagrados na literatura, o *MaxThroughput* (MT) e o *Round Robin* (RR). O desempenho será comparado tendo como base a vazão média proporcionada aos UE com tráfego de videochamada, independentemente da localização destes UE na célula. Os resultados descritos a seguir representam a média de 10 execuções de simulação.

Na Figura 4 é apresentada a vazão obtida pelos UE variando os escalonadores e a quantidade total de UE na célula durante a simulação. Os dados apresentados nesta figura levam em consideração apenas os UE com tráfego de videochamada. A maior vazão média por UE foi atingida pelo esquema de alocação de recursos proposto neste trabalho, apresentando valores maiores que os obtidos pelo MT e RR.

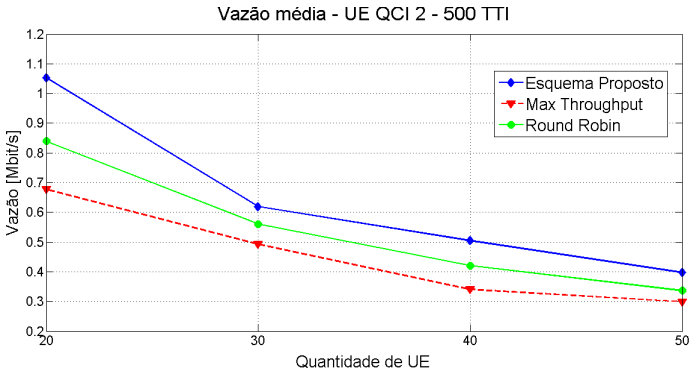

Fig. 4. Vazão média dos UE com tráfego de videochamada

A vazão proporcionada aos UE com tráfego de videochamada, pelo esquema proposto, é superior ao mínimo definido na seção III, mesmo num cenário com maior número de UE na célula.

Na Figura 5 é apresentada a vazão média de dos UE, sendo considerados todos os UE, independente do tipo de tráfego. Como esperado o esquema MT obteve os maiores valores de vazão, isso por priorizar os UE com melhores condições de canal.

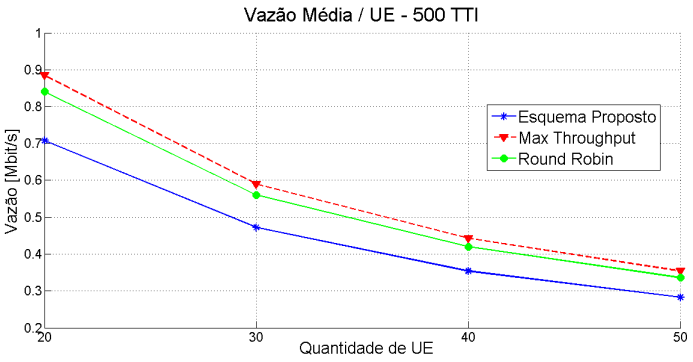

Fig. 5. Vazão média dos UE

VI. Conclusões

Este artigo considerou uma rede LTE-A com a presença de nós de repetição, buscando maximizar a vazão dos UE com tráfego de videochamada. Um esquema de alocação de recursos para o enlace *uplink* que ofereça qualidade de serviço num cenário de tráfego misto foi apresentado.

Os resultados das simulações realizadas mostraram o esquema proposto como eficiente em cenários que possuem tráfego de videochamada, uma vez que conseguiu fornecer a vazão mínima definida na seção IV para os UE com esse tipo de tráfego. Mesmo no cenário com maior número de UE na célula o esquema proposto forneceu vazão média suficiente aos UE com tráfego de videochamada.

Como trabalho futuro pretende-se implementar técnicas que permitam melhorar a eficiência energética dos UE.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo apoio e suporte ao longo desta pesquisa.

Referências

[1] (2019) Telecoms.com Annual Industry Survey 2019. [Online]. Available: https://telecoms.com/intelligence/telecoms-com-annual-industry-survey-2019/

[2] M. Vincent, K. V. Babu, M. Arthi, and P. Arulmozhivarman, "A novel fuzzy based relay node deployment scheme for multi-hop relay network," *Procedia Technology*, vol. 24, pp. 842–853, 2016.

[3] F. Gomez-Cuba and F. J. Gonzalez-Castano, "Improving third-party relaying for LTE-a: A realistic simulation approach," in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, jun 2014.

[4] Ömer Bulakci, A. Awada, A. B. Saleh, S. Redana, and J. Hämäläinen, "Automated uplink power control optimization in LTE-advanced relay networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2013, no. 1, jan 2013.

[5] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, Third Edition*, 3rd ed. USA: Academic Press, Inc., 2016.

[6] 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.

[7] H. Lei and X. Li, "System level study of LTE uplink employing SC-FDMA and virtual MU-MIMO," in *2009 IEEE International Conference on Communications Technology and Applications*. IEEE, oct 2009.

[8] S. N. K. Marwat, T. Weerawardane, Y. Zaki, C. Goerg, and A. Timm-Giel, "Analysis of radio resource allocation in LTE uplink," *Wireless Personal Communications*, vol. 79, no. 3, pp. 2305–2322, aug 2014.

[9] H. E. Bilisik and R. Sokullu, "A new channel-aware LTE-a uplink resource allocation scheduling algorithm," in *2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR)*. IEEE, nov 2017.

[10] A. Ragaleux, S. Baey, and M. Karaca, "Standard-compliant LTE-a uplink scheduling scheme with quality of service," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 8, pp. 7207–7222, aug 2017.

[11] E. H. S. Cardoso, C. P. A. da Silva, F. P. Monteiro, and C. R. L. Francês, "AnÁlise de desempenho de algoritmos de escalonamento de recursos em redes lte heterogÊneas," in *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, ago 2015.

[12] K. Arshad, "LTE system level performance in the presence of CQI feedback uplink delay and mobility," in *2015 International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA'15)*. IEEE, feb 2015.

[13] J.-Y. Chang and Y.-S. Lin, "An efficient base station and relay station placement scheme for multi-hop relay networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 82, no. 3, pp. 1907–1929, jan 2015.

[14] F.-C. Kuo, K.-C. Ting, H.-C. Wang, C.-C. Tseng, and M.-W. Chen, "Differentiating and scheduling LTE uplink traffic based on exponentially weighted moving average of data rate," *Mobile Networks and Applications*, vol. 22, no. 1, pp. 113–124, feb 2016.

[15] Z. Kaleem, B. Hui, and K. Chang, "QoS priority-based dynamic frequency band allocation algorithm for load balancing and interference avoidance in 3gpp LTE HetNet," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2014, no. 1, nov 2014.

[16] P. E. Mogensen, T. Koivisto, K. I. Pedersen, I. Z. Kovacs, B. Raaf, K. Pajukoski, and M. J. Rinne, "LTE-advanced: The path towards gigabit/s in wireless mobile communications," in *2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*. IEEE, may 2009.

[17] A. Yaver, D. Kolmas, and J. Lachowski, "Resource utilization with relays in LTE-advanced networks," in *2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering(CCECE)*. IEEE, may 2011.

[18] D. Triantafyllopoulou and K. Moessner, "QoS and energy efficient resource allocation in downlink OFDMA systems," in *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, jun 2015.

[19] B. Coppin, *Artificial Intelligence Illuminated*. Jones and Bartlett Publishers, Inc, 2004.

[20] R. Ruby and V. C. Leung, "Uplink scheduling solution for enhancing throughput and fairness in relayed long-term evolution networks," *IET Communications*, vol. 8, no. 6, pp. 813–825, apr 2014.

[21] M. Rupp, S. Schwarz, and M. Taranetz, *The Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation*, 1st ed., ser. Signals and Communication Technology. Springer Singapore, 2016.

[22] (2018) Bandwidth Requirements for Meetings with Cisco Webex and Collaboration Meeting Rooms White Paper. [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/conferencing/webex-cloud-connected-audio/white-paper-c11-735650.html