



UM ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO *DOWNLINK* DE REDES LTE

André Luiz Barroso¹, Paulo Roberto Guardieiro

FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – A popularização dos smartphones aumentou a demanda do tráfego de aplicações de multimídia, como por exemplo, vídeo *streaming* e videoconferência. O objetivo deste estudo é investigar o desempenho dos algoritmos de escalonamento na transmissão *downlink* para aplicações de videoconferência em sistemas *Long Term Evolution*. Neste trabalho, foram analisados seis algoritmos de escalonamento: *Round Robin*, *Proportional Fair*, *Blind Equal Throughput*, *Token Bank Fair Queue*, *Channel and Quality of Service Aware* e *Priority Set Scheduler*, com base nas métricas de desempenho de vazão, atraso, taxa de perda de pacotes e índice de justiça. Os resultados mostraram que o algoritmo *Channel and Quality of Service Aware* apresentou melhor desempenho do que os outros algoritmos, uma vez que apresentou maior vazão, com menor atraso e baixa perda de pacotes.

Palavras-Chave – escalonamento *downlink*, LTE, ns-3, QoS.

A PERFORMANCE COMPARATIVE STUDY OF *DOWNLINK* SCHEDULING ALGORITHMS IN LTE NETWORK

Abstract – The popularization of smartphones has increased the demand for multimedia traffic application, such as video streaming and videoconference. The purpose of this study is to investigate the performance of scheduling algorithms in *downlink* transmission for video conference in *Long Term Evolution* systems. In this paper, six scheduling algorithms were analyzed: *Round Robin*, *Proportional Fair*, *Blind Equal Throughput*, *Token Bank Fair Queue*, *Channel and Quality of Service Aware* and *Priority Set Scheduler*, all based on performance metrics of throughput, delay, rate of packet loss and index of justice. The results showed that the *Channel and Quality of Service Aware* algorithm presented better performance than the other algorithms, since it has higher throughput with lower delay and packet loss.

Keywords – *downlink scheduler*, LTE, ns-3, QoS.

I. INTRODUÇÃO

A tecnologia *Long Term Evolution* (LTE) vem sendo cada vez mais difundida e utilizada devido a algumas de suas qualidades como a possibilidade de elevadas taxas de dados com baixa latência quando comparada com suas tecnologias predecessoras.

Um dos pontos principais da rede LTE está no gerenciamento dinâmico dos recursos de rádio conduzidos por um escalonador situado na camada *Medium Access Control* (MAC) na eNodeB [1]. O escalonador não é especificado pelo *Third Generation Partnership Project* (3GPP), permitindo que cada fabricante/operadora determine qual estratégia de escalonamento será adotada de forma a melhor atender seus clientes. O objetivo geral da maioria dos escalonadores é aproveitar as rápidas variações de canal e escalonar recursos para que possa transmitir com condições vantajosas de canal [2].

Um bom algoritmo de escalonamento deve considerar vários critérios de desempenho, como vazão, atraso, *jitter* e probabilidade de perda, permitindo um bom aproveitamento do espectro de frequência e atendendo as necessidades de *Quality of Service* (QoS) de cada aplicação.

As aplicações de vídeo correspondem à maior parcela de utilização do tráfego da Internet e sua tendência é de que cresça ainda mais [3].

O objetivo deste trabalho é avaliar comparativamente o desempenho de algoritmos de escalonamento *downlink* em cenários de grande demanda por vazão, devido ao aumento da utilização da rede para o tráfego de vídeo. A análise é feita através de simulações com diferentes tipos de tráfegos de *background*.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II apresenta uma visão geral das redes LTE e seu sistema de escalonamento de recursos no *downlink*. A Seção III descreve o funcionamento dos algoritmos de escalonamento utilizados neste trabalho. Em seguida, na Seção IV é apresentado a modelagem e simulação do sistema. Na Seção V realiza-se a apresentação e análise de resultados. E por último, na Seção VI, são apresentadas as conclusões do trabalho.

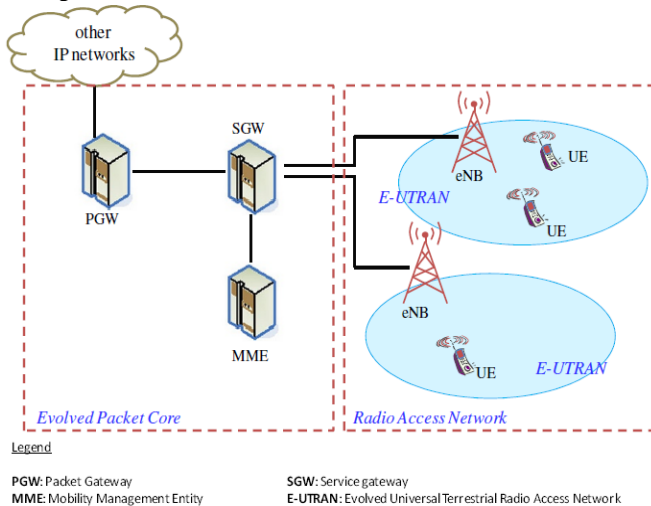
¹ natios@ufu.br.

II. AS REDES LTE

A tecnologia LTE evoluiu do *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) e foi iniciado em 2004 como um projeto do órgão de telecomunicações conhecido como 3GPP. Paralelamente ao desenvolvimento do LTE, houve uma evolução da arquitetura geral da rede 3GPP, denominada *System Architecture Evolution* (SAE), incluindo tanto a rede de acesso por rádio quanto ao *Evolved Packet Core* (EPC). Os requisitos também foram definidos na evolução da arquitetura, levando a uma nova arquitetura de rede de acesso sem fio com um único tipo de nó, a eNodeB, bem como uma nova arquitetura de rede [4]. Essa evolução se fez para garantir que a tecnologia permaneça competitiva no futuro e foram estabelecidos alguns requisitos descritos na *Release 8*. Os requisitos podem ser divididos em diferentes categorias como desempenho, cobertura, implantação e complexidade.

Na Figura 1 temos o SAE que consiste no EPC e uma rede de acesso por rádio, denominada *Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) [5].

Figura 1: O *Service Architecture Evolution* de rede LTE [5].



O *Evolved Packet System* (EPS) é puramente baseado em *Internet Protocol* (IP). Serviços em tempo real e serviços de comunicação de dados serão transportados pelo IP. Usa-se *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) no *downlink* e *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) no *uplink*. O OFDMA é uma técnica de acesso em que a banda para transmissão do sinal é dividida em subportadoras sobrepostas, porém ortogonais e essa banda é compartilhada por vários usuários simultaneamente.

Na rede LTE não há um controlador centralizado, e os eNodeBs normalmente são conectados entre si via interface X2 e ao EPC pela interface S1. A razão para distribuir a inteligência entre as eNodeBs no LTE é acelerar a configuração da conexão e reduzir o tempo necessário de *handover*. Com a solução distribuída é possível uma rápida comunicação entre o *User Equipment* (UE) e a eNodeB pelo protocolo da camada MAC que é responsável pelo escalonamento.

O escalonamento é feito a cada *Transmission Time Interval* (TTI) e o algoritmo de escalonamento utilizado é um

componente chave para uma rápida e eficiente obtenção de recursos de rádio. Durante cada TTI, o escalonador deve:

- Priorizar os requisitos de QoS entre os UEs;
- Informar os UEs sobre os recursos de rádio alocados;
- Decidir qual esquema de modulação e codificação usar, utilizando-se de relatórios sobre a qualidade de rádio percebida, enviados pelos UEs.

Para cada UE escalonado em um TTI, os dados serão transportados em um *Transport Block* (TB).

Para alcançar alta eficiência espectral de rádio, bem como permitir escalonamento eficiente no *Time Domain* (TD) e no *Frequency Domain* (FD), uma abordagem *multicarrier* para acesso múltiplo foi escolhida pelo 3GPP.

O LTE foi desenvolvido para várias bandas de frequência. As larguras de banda disponíveis também são flexíveis começando com 1,4 MHz até 20 MHz. O LTE suporta as duas tecnologias, *Time Division Duplex* (TDD) e *Frequency Division Duplex* (FDD). Na *release 8* foram especificadas quinze bandas para FDD e oito bandas para TDD.

III. ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO DOWNLINK

Nesta seção são apresentados alguns dos principais algoritmos de escalonamento *downlink* de redes LTE presentes na literatura. Cada algoritmo de escalonamento contém uma métrica distinta visando otimizar o sistema priorizando alguns aspectos como a eficiência espectral e o índice de justiça.

A. Round Robin (RR)

O escalonador RR divide os recursos disponíveis entre os fluxos ativos. Se o número de *Resource Block Group* (RBGs) for maior que o número de fluxos ativos, todos os fluxos poderão ser alocados no mesmo *subframe*. Caso contrário, no próximo *subframe*, a alocação começará a partir do último fluxo que não foi alocado [6]. Isso pode ser considerado um escalonamento justo, no sentido de que a mesma quantidade de RBs é dada a cada *link* de comunicação. No entanto, não é justo no sentido de fornecer a mesma qualidade de serviço para todos os usuários [2].

B. Proportional Fair (PF)

O escalonador PF prioriza usuários cuja qualidade de canal instantânea seja alta em relação à sua condição de canal média ao longo do tempo. Sua métrica é dada pela equação (1) [6].

$$M_{PF}^{(k,j)}(t) = \arg \max_{j=1,\dots,N} \left(\frac{R_j(k,t)}{T_j(t)} \right) \quad (1)$$

Onde $T_j(t)$ é a vazão média anterior do usuário j , $R_j(k,t)$ é a taxa alcançável em bit/s para o usuário j no RBG k e *subframe* t , sendo definida pela equação (2).

$$R_j(k,t) = \frac{S(M_{j,k}(t), 1)}{\tau} \quad (2)$$

Onde τ é a duração do TTI, $M_{j,k}(t)$ é o *Modulation and Coding Scheme* (MCS) usado pelo usuário j no bloco de recurso k e $S(M, B)$ é o tamanho em bits do TB, conforme definido em [7]. No início de cada *subframe* t , cada RBG é atribuído a um determinado usuário.

C. Blind Equal Throughput (BET)

O BET tenta alcançar a mesma taxa de transferência para todos os usuários, independentemente da qualidade de canal de rádio [8]. A métrica de prioridade do escalonador BET é definida na equação (3).

$$M_{BET}(t) = \arg \max_{j=1,\dots,N} \left(\frac{1}{T_j(t)} \right) \quad (3)$$

Para prover justiça, este algoritmo de escalonamento privilegia os usuários com baixo *Channel Quality Indicator* (CQI) atribuindo uma maior quantidade de RBs, porém resultando em detrimento da eficiência espectral.

D. Token Bank Fair Queue (TBFQ)

O TBFQ é um escalonador QoS-aware baseado no mecanismo conhecido como *leaky bucket* que controla os fluxos conforme um determinado perfil de tráfego. Cada fluxo j é caracterizado pelos parâmetros:

- t_j : Taxa de chegada de pacotes [Bytes/s].
- r_j : Taxa de geração de *token* [Bytes/s].
- p_j : Tamanho do *pool token* [Bytes].
- E_j : Contador do número de *tokens* pelo fluxo j .

Cada quilobyte consome z *tokens*. Além disso, o TBFQ mantém um banco de *tokens* compartilhado para equilibrar o tráfego entre diferentes fluxos. Se a taxa de geração de *tokens* r_j for maior que a taxa de chegada de pacotes t_j , os *tokens* que excedem o *pool* de *tokens* serão adicionados ao banco de *tokens* e E_j será aumentado na mesma quantia. Caso contrário, o fluxo j precisa retirar *tokens* do banco de *tokens*. O TBFQ pode policiar o tráfego definindo a taxa de geração de *tokens* para limitar a taxa de transferência [9].

E. Channel and QoS Aware Scheduler (CQA)

O CQA é um escalonador QoS-aware híbrido, ou seja, combina as operações de escalonamento TD e FD [1]. Utiliza para alocação de recursos, parâmetros de QoS como o atraso, perda e *Guaranteed Bit Rate* (GBR). Dentro de um RBG, o CQA seleciona dentre todos os UEs aqueles que não receberam a taxa garantida e os agrupa pelo atraso *Head of Line* (HOL), como mostrado na equação (4).

$$M_{td}^j(t) = \left[\frac{d_{HOL}^j(t)}{g} \right] \quad (4)$$

Onde:

- $d_{HOL}^j(t)$ - Valor atual do atraso HOL do fluxo j .
- g - Granularidade dos grupos.

Dependendo do valor g pode-se ter uma maior ou menor diversidade de usuários, influenciando no impacto do d_{HOL}^j nas decisões do escalonador. Esse parâmetro deve ser configurado de acordo com a capacidade da rede e o número médio esperado de usuários no sistema.

Esse agrupamento é usado para priorizar a alocação de RBGs para os UEs com maior valor de atraso HOL. No FD, para cada RBG, o CQA atribui o RBG atual ao usuário j que tem o valor máximo da métrica FD que é definida como mostrado na equação (5).

$$M_{fd}^{(k,j)}(t) = d_{HOL}^j(t) \cdot \frac{GBR^j}{T_j(t)} \cdot M_{PF}^{(k,j)}(t) \quad (5)$$

Sendo:

GBR^j - Taxa de bits especificada na *bearer* EPS do fluxo j .

O CQA ainda realiza uma maximização da capacidade do canal, atribuindo os recursos aos UEs que podem utilizá-los com maior eficiência a partir das técnicas do PF [10].

F. Priority Set Scheduler (PSS)

O PSS é um escalonador QoS-aware híbrido [11]. Ele controla a justiça entre os UEs usando um *Target Bit Rate* (TBR).

No escalonamento TD, o PSS seleciona os UEs cujo *buffer Radio Link Control* (RLC) não esteja vazio e os divide em dois conjuntos baseados no TBR. O primeiro conjunto é de UEs com vazão média menor que o TBR e o escalonamento é feito usando a mesma métrica do BET. O segundo conjunto contém o restante dos UEs e são escalonados seguindo a mesma métrica do PF.

Assim, os RBGs no *subframe* são atribuídos para o UE com a máxima métrica do escalonador PF, ou seja, os UEs pertencentes ao primeiro conjunto têm prioridade sobre os do segundo conjunto. Então, um determinado número de UEs especificados pela variável N_{max} , com a métrica mais alta são selecionados pelo PSS para o escalonamento FD. Nesta etapa o PSS aloca o RBG k ao UE n que maximiza a métrica do PF. Além disso, o PSS no FD também fornece uma métrica de peso $W[n]$ para ajudar a controlar a justiça em caso de poucos UEs, conforme definido na equação (6).

$$W[n] = \max \left(1, \frac{TBR}{T_j(t)} \right) \quad (6)$$

No FD o PSS seleciona o UE que maximiza o produto da métrica do PF pelo peso $W[n]$.

IV. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Os principais parâmetros de simulação estão resumidos na Tabela I, enquanto os parâmetros restantes foram definidos pela configuração padrão do ns-3.

Tabela I - Parâmetros de simulação

Tabela I - Parâmetros de simulação	
Modelo de antena da eNodeB	Modelo de antena isotrópico
Potência TX da eNodeB	46 dBm
Potência TX do UE	23 dBm
Largura de banda	25 RBs (5 MHz)
Esquema AMC	PiroEW2010 [13]
Modo RLC	UM (tamanho do <i>buffer</i> : 10 MB)
Modelo perda de caminho	COST 231
Modelo perda de desvanecimento	<i>Pedestrian EPA model</i> 3 km/h <i>Steady state random waypoint</i> [14]
Modelo de mobilidade do usuário	Velocidade Min.: 0.8 m/s
	Velocidade Max.: 0.83 m/s
	Pausa Min.: 0s / Pausa Max.: 0.1s
	Retângulo: 500m x 500m
Sequência de vídeo	akiyo (300 frames)
Resolução do vídeo	CIF (352x288)
Informações de vídeo	Taxa de Bits: 300 kbps
	Taxa do <i>Frame</i> : 25 fps
	Grupo de imagens: 30
	<i>Maximum Transmission Unit</i> (MTU): 1460 Bytes
	<i>Encoder</i> : ffmpeg
Rodadas de simulação	30
Tempo de simulação	30 segundos

O ns-3 é um simulador de eventos discretos para redes de computadores, que possui um módulo para o estudo de redes LTE. Escolheu-se este simulador por ser *open source*, bem documentado e ter boa aceitação na comunidade científica. Este simulador é escrito em linguagem C++.

Para o modelo de propagação foi utilizado o COST 231 que foi desenvolvido para ambientes urbanos com utilização na faixa de frequências compreendida entre 800 e 2000MHz [12]. O módulo LTE do ns-3 inclui um modelo de desvanecimento baseado em rastreamento que faz uso de feixes pré-calculados com o intuito de limitar a complexidade computacional das simulações e podem ser obtidos usando um *script* para o MATLAB que vem com o ns-3.

Neste cenário considerou-se as seguintes aplicações para o tráfego de *background*: *Voice over IP* (VoIP), transferência de arquivos e videoconferência.

As aplicações foram divididas da seguinte forma: 25% dos usuários com tráfego de transferência de arquivos, outros 25% com tráfego VoIP e os 50% restantes foram dedicados para videoconferência.

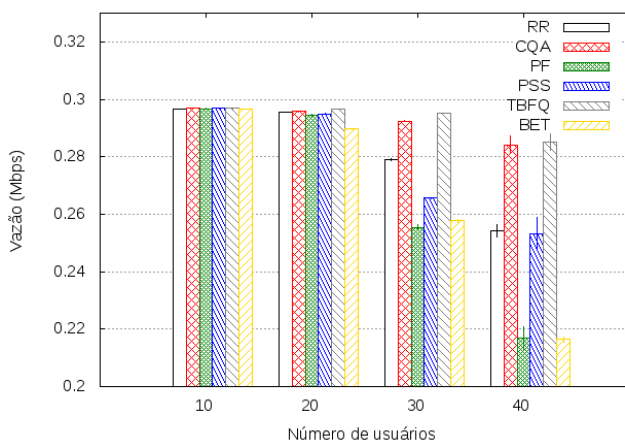
V. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

A vazão é um dos principais indicadores de desempenho do sistema LTE. No cenário analisado as aplicações de videoconferência têm uma vazão média de 300 kbps. A Figura 2 mostra a vazão média por usuário de videoconferência, percebe-se que mesmo quando a rede atinge um ponto de saturação com 30 usuários de videoconferência e 30 de *background*, os algoritmos de escalonamentos que levam em consideração o QoS tendem a manter o tráfego das aplicações de videoconferência próximo de 300 kbps. Dentre os algoritmos avaliados os que se destacaram em vazão foram o CQA e o TBFQ.

O CQA apresenta elevada vazão em relação aos demais para aplicações de videoconferência pois em sua métrica são consideradas o HOL, o GBR em conjunto com a métrica do PF que prioriza usuários com melhores condições de canal como mostrado na equação (5) da seção III.

O TBFQ penaliza tráfego excessivo e tenta atender os requisitos de QoS solicitados pela aplicação.

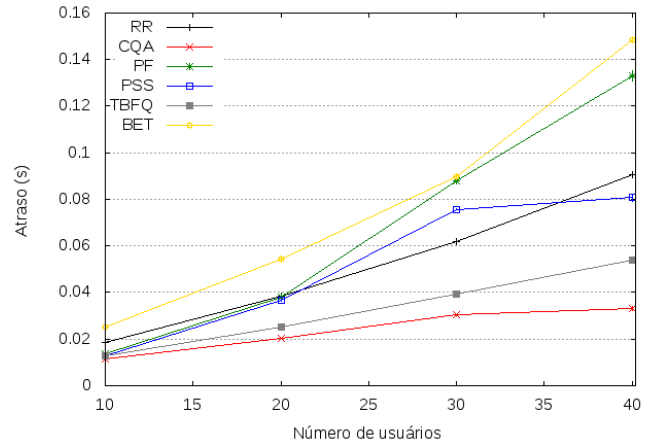
Figura 2: Vazão média por usuário de videoconferência.



Para aplicações de videoconferência, com exigências de QoS, outro parâmetro que indica desempenho é o atraso

médio. Este critério pode ser analisado na Figura 3. Nota-se que os escalonadores *QoS-aware* apresentam melhores resultados e entre eles o CQA tem o menor atraso médio por usuário de videoconferência na rede de acesso a rádio. Ao considerar o HOL, priorizando usuários de videoconferência, o CQA obtém o menor atraso dentre os algoritmos de escalonamento analisados.

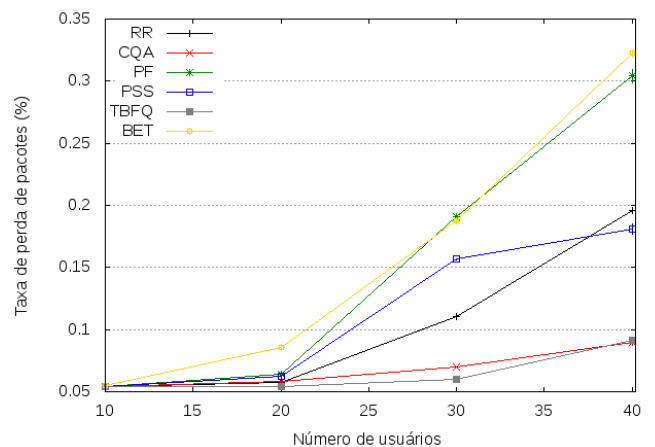
Figura 3: Atraso médio para videoconferência.



A taxa de perda de pacotes é outro importante parâmetro de desempenho para videoconferências, pois são sensíveis à perda de pacotes. Isto deve ser esperado, uma vez que os *interframes* exigem a informação dos *frames* precedentes, assim a perda de um frame pode atrapalhar o processo de reconstruir a imagem de vídeo. Para que as perdas não fossem causadas por sobrecarga do *buffer* RLC o mesmo foi configurado para 10 MB assegurando que as perdas fossem causadas pelo processo de descarte.

Na Figura 4 é possível perceber que conforme aumenta o número de UEs na rede há um incremento na perda de pacotes. E também, os algoritmos de escalonamentos que não levam em consideração a qualidade de serviço como o PF e o BET, tem altas taxas de perda de pacote enquanto os demais apresentam uma menor taxa de perda de pacotes.

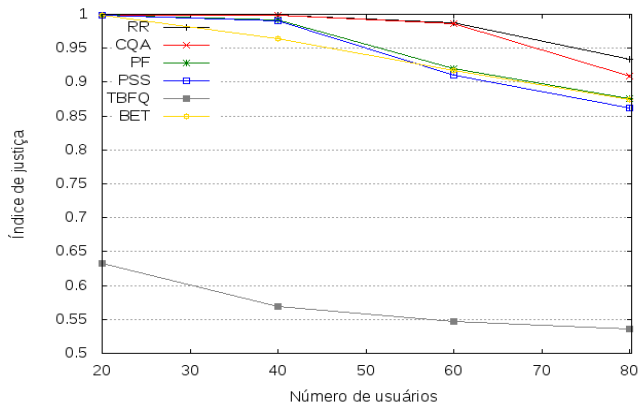
Figura 4: Taxa média de perda de pacotes para videoconferência.



O índice de justiça é mostrado na Figura 5. É possível notar que neste quesito o RR apresenta os melhores resultados, mesmo no cenário com 80 UEs. Sendo destes 80 UEs, 40 são

de videoconferência. O TBFQ ao penalizar usuários de transferência de arquivos obteve os menores resultados para o índice de justiça.

Figura 5: Índice de justiça.



VI. CONCLUSOES

Neste artigo apresenta-se um estudo comparativo de desempenho de algoritmos de escalonamento *downlink* para redes LTE. O objetivo deste estudo é investigar o desempenho dos algoritmos de escalonamento para as aplicações de videoconferência.

O desempenho dos algoritmos de escalonamento foi avaliado em termos de vazão, atraso, taxa de perda de pacotes e índice de justiça. Os resultados da simulação demonstram que o algoritmo CQA apresenta melhor desempenho que os outros algoritmos

Para trabalhos futuros pretende-se apresentar uma proposta de algoritmo de escalonamento *QoS-aware* para o tráfego LTE *downlink*, que seja otimizado para videoconferência.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Zhou, N. Baldo e M. Miozzo, "Implementation and Validation of LTE Downlink Schedulers for ns-3," *Proceedings of the Sixth International Conference on Simulation Tools and Techniques*, pp. 211-218, 2013.
- [2] E. Dahlman, S. Parkvall e J. Sköld, 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, 3ª ed., Elsevier, 2016.
- [3] Cisco, "VNI Forecast Highlights," Cisco, [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights.html. [Acesso em Junho 2018].
- [4] M. Olsson, S. Sultana, S. Rommer, L. Frid e C. Mulligan, SAE and the Evolved Packet Core - Driving the Mobile Broadband Revolution, Academic Press, 2009.
- [5] F. Capozzi, G. Piro, L. Grieco, G. Boggia e 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.
- [6] NS-3 Consortium, "LTE Module," [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte.html>. [Acesso em Junho 2018].
- [7] 3GPP TS 36.213 V11.0.0, "Physical layer procedures," 2012.
- [8] P. Kela, J. Puttonen, N. Kolehmainen, T. Ristaniemi, T. Henttonen e M. Moision, "Dynamic packet scheduling performance in UTRA long term evolution downlink," *3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, pp. 308-313, 2008.
- [9] W. K. Wong, H. Y. Tang e V. C. M. Leung, "Token bank fair queuing: a new scheduling algorithm for wireless multimedia services," *International Journal of Communication Systems*, vol. 17, nº 6, pp. 591-614, 2004.
- [10] B. Bojovic e N. Baldo, "A new channel and QoS aware scheduler to enhance the capacity of voice over LTE systems," em *11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSDI4)*, 2014.
- [11] G. Monghal, K. I. Pedersen, I. Z. Kovács e P. E. Mogensen, "QoS oriented time and frequency domain packet schedulers for the UTRAN long term evolution," *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 2532-2536, 2008.
- [12] "Digital Mobile Radio: COST 231 View on the Evolution Towards 3rd Generation Systems," em *Commission of the European Communities, L-2920*, Luxemburgo, 1989.
- [13] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia e P. Camarda, "A two-level scheduling algorithm for QoS support in the downlink of LTE cellular networks," em *2010 European Wireless Conference (EW)*, 2010.
- [14] W. Navidi e T. Camp, "Stationary distributions for the random waypoint mobility model," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3, nº 1, pp. 99-108, 2004.
- [15] S. H. da Mata e P. R. Guardieiro, "Resource allocation for the LTE uplink based on Genetic Algorithms in mixed traffic environments," *Computer Communications*, vol. 107, pp. 125-137, 2017.
- [16] EvalVid Framework, [Online]. Available: <http://www.tkn.tu-berlin.de/menue/research/evalvid>. [Acesso em Junho 2018].