

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO DE RECURSOS EM REDES LTE HETEROGÊNEAS

Evelin Helena Silva Cardoso¹

Carlos Patrick Alves da Silva²

Flávia Pessoa Monteiro³

Carlos Renato Lisboa Francês⁴

UFPA - Universidade Federal do Pará

Rua Augusto Corrêa, 1 – Belém - PA

¹ehs.cardoso@gmail.com, ²patrickalves@ufpa.br, ³flaviamonteiro.comp@gmail.com,

⁴rfrances@ufpa.br

RESUMO

O escalonamento de recursos é um aspecto crucial em sistemas LTE devido à demanda por alta eficiência espectral, onde objetiva-se obter a maior vazão possível com base nos recursos espectrais disponíveis e nos requisitos de qualidade de serviço das aplicações dos usuários. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de algoritmos de escalonamento de recursos de rádio em redes LTE heterogêneas por meio de critérios que avaliam a vazão de dados, atraso, *jitter*, justiça e complexidade computacional. Este estudo avalia sete escalonadores de recursos: *Round Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF), *Maximum Throughput* (MT), *Throughput to Average* (TTA), *Blind Equal Throughput* (BET), *Priority Set* (PSS) e *Channel and QoS Aware* (CQA). O estudo é baseado em simulações computacionais a partir do *software* NS-3 (*Network Simulator*). Os resultados mostraram que os algoritmos oportunistas, que tiram vantagem da diversidade multiusuário, alcançam maiores taxas de transferência, mas requerem maior complexidade computacional. Apesar da baixa complexidade de implementação, os algoritmos que buscam apenas a justiça na distribuição de recursos não oferecem garantia de bons níveis de vazão.

PALAVRAS CHAVE. Escalonamento de Recursos, LTE, Redes Heterogêneas.

Área principal. Simulação

ABSTRACT

The resource scheduling is crucial in LTE systems due the demand for high spectral efficiency, working in order to obtain high data rates based on the available spectrum resources and requirements for QoS of user's applications. This study aims to evaluate the performance of resource scheduling algorithms in heterogeneous LTE networks by criteria that analyses the throughput, delay, jitter, justice and computational complexity. This study evaluates seven resource schedulers: Round Robin (RR), Proportional Fair (PF), Maximum Throughput (MT), Throughput to Average (TTA), Blind Equal Throughput (BET), Priority Set (PSS) and Channel and QoS Aware (CQA). The study is based on computer simulations carried out with NS-3 software. Simulation results show that the opportunistic algorithms which take advantage from the multi-user diversity reach higher transfer rates but require more computational complexity. Despite their lower implementation complexity, the fair algorithms meets the fairness but dont offers guarantee of good level of throughput

KEYWORDS. Resource Scheduling, LTE, Heterogeneous Networks.

Main area. Simulation

1. Introdução

A rede celular é a rede móvel mais popular e acessível na atualidade e fornece um serviço estável e constante sob a maioria dos tipos de mobilidade. É esperado pelo setor das telecomunicações que a demanda por serviços de comunicação celular continue crescendo, seguida por novas aplicações multimídia e a popularização da Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*) (UCKELMANN; HARRISON; MICHAHELLES, 2011). Motivado por essa crescente demanda por serviços de banda larga móvel, o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) especificou a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*), que, segundo Ali-Yahiya (2011), teve seu projeto iniciado em 2004, porém os seus serviços só começaram a ser comercializados em 2009. As primeiras versões comerciais do LTE fazem parte das especificações do *Release 8* do 3GPP, que também ficou conhecida como a tecnologia 3.9G.

Para Sesia, Toufik e Baker (2011), as redes LTE representam a proposta do 3GPP para proporcionar melhor utilização dos recursos de rádio, maior eficiência espectral e baixa latência. Dessa forma, torna possível a implementação de aplicações exigentes em termos de vazão elevada e atrasos reduzidos. A tecnologia LTE, portanto, possibilita o uso de serviços e aplicações que demandam uma alta taxa de dados sendo asseguradas as garantias de qualidade de serviço exigidas por essas aplicações. Outra proposta do sistema LTE é a adição de células menores (*smallcells*), através de equipamentos de baixa potência, à rede das macrocélulas, com o objetivo de melhorar a cobertura em determinados locais e ainda desafogar o tráfego nas mesmas (WANNSTROM; MALLINSON, 2013). Esta alternativa, que tem sido popularizada como Redes LTE Heterogêneas, surge como uma solução de baixo custo para a operadora e é menos burocrática do que a implantação de novas macrocélulas. Neste contexto, as *femtocells* são pequenas Estações Radio Base (ERBs) desenvolvidas para operar dentro de um pequeno raio de cobertura. Instaladas dentro de residências ou escritórios, foram criadas para melhorar a cobertura *indoor*, ligando a telefonia celular de banda larga à internet de alta velocidade. Essa tecnologia foi introduzida pelo 3GPP na *Release 9* na forma de *Home eNodeB* (HeNB) (BRYDON, 2012).

Segundo Dahlman, Parkvall e Sköld (2011), os mecanismos de escalonamento de recursos no LTE têm se revelado um dos principais desafios para este sistema. Para Ali-Yahiya (2011), o escalonamento de recursos refere-se à atividade de alocação de recursos de rádio necessários para a transmissão de dados para os equipamentos de usuário (UE, *User Equipment*) e é realizada a cada intervalo de transmissão (TTI, *Transmission Time Interval*). Nos sistemas LTE, o escalonador está localizado na estação rádio base, denominada de *evolved-NodeB* (eNodeB ou eNB), e é responsável pela alocação dinâmica dos recursos nos canais de *downlink* e no *uplink* da rede.

De acordo com Kwan e Leung (2010), o papel do escalonador é determinar a alocação de uma quantidade de recursos disponíveis para um conjunto de UEs, a fim de maximizar alguma função objetivo, tais como, a vazão global da célula e a justiça na distribuição dos recursos. O 3GPP, porém, não especifica o tipo de escalonador que deve ser utilizado ou a política de alocação de recursos, deixando a critério dos fabricantes e desenvolvedores de equipamentos a escolha do algoritmo a ser implementado (ALI-YAHIYA, 2011). Em virtude dessa não definição, vários algoritmos têm sido propostos na literatura com o objetivo de aumentar a qualidade de serviço dos sistemas móveis. As abordagens são diversas, onde é possível levar em conta critérios como a condição do canal, o atraso dos pacotes, o estado do *buffer*, o tipo de serviço, etc (MAGALHÃES; GUARDIEIRO, 2014).

Uma vez que cada fabricante possui a liberdade de adotar suas próprias técnicas de escalonamento, é possível que nem todos os perfis de usuários e aplicações sejam atendidos de forma satisfatória. Para Magalhães e Guardieiro (2014), um escalonador eficiente deve levar em consideração a qualidade do canal do enlace da eNodeB para o UE e a capacidade das portadoras, tendo como meta a satisfação das exigências dos usuários, buscando um compromisso ideal entre a eficiência espectral e a justiça. Esse objetivo se torna bastante desafiador, sobretudo, na presença de aplicações em tempo real.

O escalonamento de recursos interfere de maneira direta no desempenho geral do sistema e devido ao seu papel central nessa função, muitos estudos têm sido publicados sobre o

escalonamento de recursos no LTE (AFROZ; SANDRASEGARAN; GHOSAL, 2014; NURCAHYANI; MUSTIKA; SELO, 2014; SINGH; SINGH, 2013). Por se tratar de um campo aberto e dinâmico, muitos algoritmos têm sido propostos para atender às características do tráfego e as diversas exigências dos usuários da rede LTE. Apesar de ainda aparecerem em menor número, alguns trabalhos já têm sido aplicados em redes heterogêneas (DARDOURI; BOUALLEGUE, 2014; CAI *et al.*, 2014). A maioria dos trabalhos apenas aborda o desempenho do ponto de vista do usuário. Portanto, é de grande relevância realizar um estudo que se dedique não só à nível da qualidade de serviço, mas também considere o custo computacional dos algoritmos de escalonamento de recursos em redes LTE.

Este trabalho tem como objetivo realizar a análise de desempenho de algoritmos de escalonamento de recursos em redes LTE heterogêneas. O estudo se propõe a analisar diferentes classes de algoritmos. Neste estudo, sete algoritmos são avaliados: *Round Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF), *Maximum Throughput* (MT), *Throughput to Average* (TTA), *Blind Equal Throughput* (BET), *Priority Set* (PSS) e *Channel and QoS Aware* (CQA). A análise de desempenho dessas soluções se dará em torno das medidas da vazão, atraso, *jitter*, justiça e a análise qualitativa da complexidade computacional. As simulações dos cenários da rede LTE heterogênea serão realizadas no *software* livre *Network Simulator* geração 3 (NS-3). A reprodução de uma rede LTE heterogênea visa contribuir no processo de validação da análise comparativa dos algoritmos de escalonamento de recursos de rádio estudados neste trabalho.

A estrutura do trabalho está descrita a seguir: a Seção 2 traz uma breve revisão acerca do Escalonamento de Recursos no LTE e os algoritmos avaliados neste estudo. Na Seção 3, são apresentados os cenários de simulação, bem como os principais parâmetros utilizados. Na Seção 4, encontram-se alguns resultados obtidos e a análise dos mesmos. E, finalmente, a Seção 5 apresenta as principais conclusões do trabalho e aponta algumas direções para trabalhos futuros.

2. Escalonamento de Recursos em sistemas LTE

A camada física do LTE suporta dois esquemas de acesso: o OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) para o *downlink* e o SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para o *uplink* (DAHLMAN; PARKVALL; SKÖLD, 2011). Ambos os esquemas utilizam a mesma estrutura de quadros. Esta estrutura é dividida em dois domínios: tempo e frequência. Além disso, é possível modificar o esquema de modulação e codificação (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) de acordo com o nível de sinal do usuário, através da técnica *Adaptative Modulation and Coding* (AMC) (ALI-YAHIYA, 2011).

Segundo Sesia, Toufik e Baker (2011), a menor unidade de recurso no LTE é o *Resource Element* (RE). Considerando uma grade de tempo x frequência, um RE equivale a uma subportadora OFDM espaçada de 15 KHz durante o intervalo de tempo do símbolo OFDM (ALI-YAHIYA, 2011). A Figura 1 traz a estrutura de quadro básica da grade de tempo x frequência no LTE para o caso de um prefixo cíclico normal (7 símbolos).

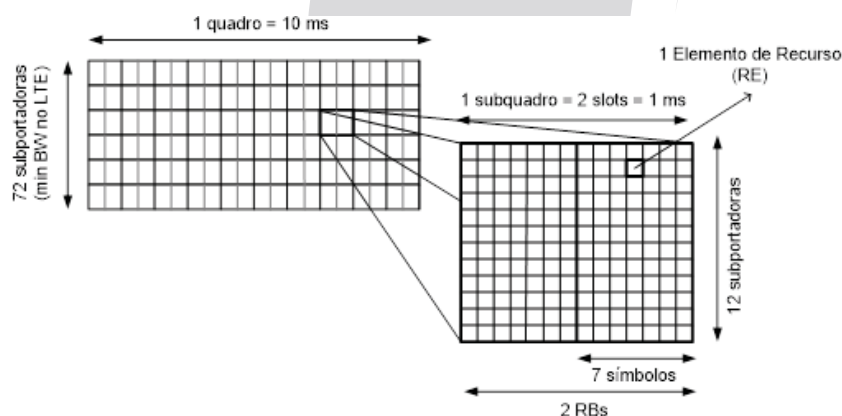


Figura 1 – Estrutura de um quadro LTE, utilizando prefixo cíclico normal.

Da Figura 1, vê-se que cada quadro tem duração de 10 ms e é formado por 10 subquadros de 1 ms cada. Um subquadro constitui um TTI e é formado por dois *slots*, cada um com 0,5 ms de duração. Finalmente, um *slot* é formado por 6 ou 7 símbolos, dependendo do prefixo cíclico utilizado. No domínio da frequência, a largura de banda total utilizada pela rede (1,4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz) é dividida em subcanais com 12 subportadoras de 15 KHz, totalizando 180 KHz. Um *slot versus* 12 subportadoras constitui a unidade básica de recurso de rádio no LTE, chamada de bloco de recurso (RB, *Resource Block*) (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011).

No LTE, o escalonamento de recursos refere-se à atividade de alocação de RBs aos UEs que possuem fluxo ativo, a cada TTI (DAHLMAN; PARKVALL; SKÖLD, 2011). Esta atividade é necessária para a transmissão de dados de/para os UEs. A fim de utilizar os recursos disponíveis de forma eficiente, um algoritmo de escalonamento é usado na camada MAC (*Media Access Control*), que, dentre outras funções, é a responsável por esta atividade (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011). A camada MAC na eNodeB inclui escalonadores dinâmicos que alocam recursos da camada física para os canais de transporte do DL-SCH (*Downlink Scheduler*) e UL-SCH (*Uplink Scheduler*).

No geral, os escalonadores podem atribuir recursos considerando as condições de canal de cada UE, volume de tráfego e a qualidade de serviço dos fluxos, identificados através de medidas feitas na eNB e/ou reportados pelos UEs (3GPP TS 36.300 V8.9.0, 2009). São exemplos desses relatórios o indicador da qualidade do canal (CQI, *Channel Quality Indicator*) e o relatório do estado do *buffer* (BSR, *Buffer Status Report*). A atribuição de recursos consiste em blocos de recursos (RBs) associados ao esquema de modulação e codificação (MCS, *Modulation and Coding Scheme*). A alocação de recursos de rádio pode ser válida para um ou múltiplos TTIs (3GPP TS 36.300 V8.9.0, 2009). O escalonador de recursos é ainda encarregado de gerar estruturas específicas chamadas *Data Control Indication* (DCI) que são então transmitidas pela camada física da eNB para os UEs conectados, a fim de informá-los sobre a alocação de recursos em uma base *per* subquadro. A Figura 2 traz o esquema geral de alocação de recursos.

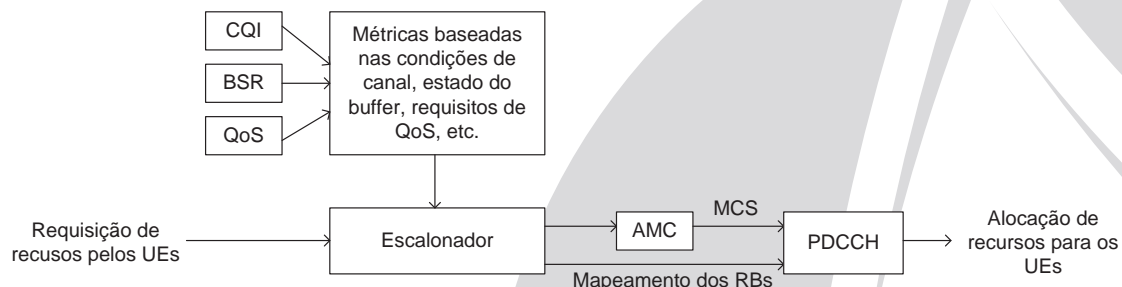


Figura 2 - Operação genérica do escalonador de recursos.

O escalonamento de recursos no LTE acontece no domínio do tempo e/ou frequência (TRIVEDI; PATEL, 2014). No domínio do tempo (TD, *Time Domain*), o objetivo é selecionar os potenciais candidatos ao escalonamento, formando um grupo de UEs chamado *Scheduling Candidate Set* (SCS), que é então passado ao escalonador do domínio da frequência (FD, *Frequency Domain*). No FD, o objetivo é alocar RBs para os UEs contidos no SCS. Porém, deve-se ressaltar que os UEs listados no SCS são considerados apenas candidatos, a alocação depende dos recursos disponíveis na eNodeB. A alocação de recursos é muitas vezes descrita em torno do *Resource Block Group* (RBG). Neste trabalho, utiliza-se a alocação de recursos Tipo O (zero), no qual um *bitmap* indica os RBGs que serão alocados a um determinado UE, onde um RBG é um conjunto de RBs consecutivos. O tamanho do RBG é dado em função da largura de banda escolhida (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011).

2.1. Algoritmos de escalonamento

De maneira geral, os escalonadores são divididos em duas classes: independentes do canal e dependentes do canal. Por sua vez, os algoritmos dependentes do canal podem ser classificados em baseados em QoS e não baseados em QoS (BENDAOU; ABDENNEBI; DIDI, 2014).

No geral, os algoritmos de escalonamento de recursos baseiam-se na comparação de métricas por RB obtidas para cada UE. Assim, o k -ésimo RB é alocado ao i -ésimo UE se sua métrica $m_{i,k}$ é a maior, ou seja, se ela satisfaz a Equação (1):

$$m_{i,k} = \max_i \{m_{i,k}\} \quad (1)$$

A. Algoritmos Independentes do canal

No geral, os algoritmos independentes do canal objetivam alcançar a justiça e a equidade na distribuição de recursos entre os UEs. Esses algoritmos não oferecem nenhuma técnica que proporcione eficiência espectral. São exemplos desta classe: *Round Robin* (RR) e *Blind Equal Throughput* (BET).

2.1.1 **Round Robin (RR):** é um esquema que busca a justiça na partilha de recursos, sem considerar as condições do canal ou requisitos de QoS. É um procedimento simples, que busca a justiça na distribuição dos recursos disponíveis, mas pode deixar a desejar em termos da vazão global do sistema (TRIVEDI; PATEL, 2014). Inicialmente, o RR ordena aleatoriamente os UEs conectados; se o número de RBGs disponível é maior que o número de UEs conectados naquele TTI, todos os UEs serão alocados no mesmo subquadro e receberão a mesma quantidade de RBs. Caso contrário, os UEs ainda não escalonados serão alocados no próximo subquadro até que todos os UEs sejam servidos (BENDAOU; ABDENNEBI; DIDI, 2014).

2.1.2 **Blind Equal Throughput (BET):** tem como objetivo alcançar justiça na vazão de dados para todos os UEs conectados. A métrica do BET é definida conforme a Equação (2) e é baseada na última média da vazão atingida $\bar{R}^i(t-1)$ por cada UE (KELA *et al.*, 2008).

$$m_{i,k}^{MT} = \frac{1}{\bar{R}^i(t-1)} \quad (2)$$

No domínio da frequência, o BET primeiro seleciona um UE com a maior métrica e então aloca um RBG para o UE em questão; calcula a vazão atingida para este UE e usa a mesma para comparar com a última média da vazão dos outros UEs. O BET continua a alocar RBGs para o mesmo UE até que sua vazão atingida, comparada com a última média da vazão dos outros UEs, não seja a menor. Feito isto, o BET irá alocar um RBG para um novo UE, que possua a menor última média da vazão e assim a alocação de recurso segue até que todos os RBGs sejam alocados naquele TTI.

B. Algoritmos Dependentes do canal não baseados em QoS

Estes algoritmos alocam recursos aos usuários levando em conta as condições de canal dos mesmos. A qualidade de canal do usuário é estimada baseada no CQI reportado à eNB, indicando a qualidade do canal percebida pelo UE e qual a taxa máxima de dados que pode ser atingida pelo mesmo naquelas condições. São exemplos desta classe: *Maximum Throughput* (MT), *Proportional Fair* (PF) e *Throughput to Average* (TTA).

2.1.3 **Maximum Throughput (MT):** O MT aloca todos os RBs ao UE que pode atingir a máxima taxa atingível $d^i(t)$ em toda a largura de banda naquele TTI (CAPOZZI *et al.*, 2012), como mostra a Equação (3). Com esta abordagem, o MT é capaz de maximizar a vazão global da célula, mas, ao mesmo tempo, desempenha uma partilha de recurso injusta para com os UEs com condições de canal ruim.

$$m_{i,k}^{MT} = d^i(t) \quad (3)$$

2.1.4 **Proportional Fair (PF):** seu principal objetivo é alcançar o equilíbrio entre a vazão e a justiça entre todos os UEs. Em sua estratégia para alcançar a justiça proporcional, O PF aloca todos os recursos ao UE com a maior razão entre a vazão atingível naquele instante e a última média da vazão atingida, como mostra a Equação (4) (SINGH; SINGH, 2013).

Por meio deste esquema, todos os UEs possuirão probabilidade de atendimento mesmo que possuam diferentes condições de canal.

$$m_{i,k}^{PF} = \frac{d^i(t)}{R^i(t-1)} \quad (4)$$

2.1.5 **Throughput to Average (TTA):** é considerado um intermediário entre o *Maximum Throughput* e o *Proportional Fair*. A sua métrica é dada em virtude da razão entre a vazão atingível para o UE 'i' em um RB 'k' específico $d_k^i(t)$ e a taxa de dados atingível para o mesmo UE em toda a largura de banda, como mostra a Equação (5) (SINGH; SINGH, 2013). Assim, quanto maior a vazão atingível para um UE em toda a largura de banda, menor será sua métrica em um único RB.

$$m_{i,k}^{TTA} = \frac{d_k^i(t)}{d^i(t)} \quad (5)$$

C. Algoritmos Dependentes do canal baseados em QoS

Esta classe de algoritmos, além de tomarem suas decisões baseados nas condições de canal dos UEs, também leva em consideração os requisitos de QoS de cada fluxo. Neste caso, são priorizados os fluxos que possuem requisitos de QoS mais rígidos, como as aplicações em tempo real, tais como *streaming* de vídeo e VoIP. São exemplos desta classe: *Priority Set* (PSS) e *Channel and QoS-aware* (CQA).

2.1.6 **Priority Set (PSS):** é um escalonador que combina operações de escalonamento no domínio do tempo e da frequência em uma só política (MONGHAL *et al.*, 2008). A fim de distinguir fluxos de baixa ou alta prioridade, ele utiliza uma taxa de bits alvo (TBR, *Target Bit Rate*). No domínio do tempo, UEs com a última média da vazão menor que a TBR formam o conjunto de alta prioridade. Os outros UEs formam o conjunto de baixa prioridade. UEs pertencentes ao primeiro e segundo conjuntos são ordenados usando as métricas dos algoritmos BET e PF, respectivamente. Assim, os UEs candidatos ao escalonamento são passados ao escalonamento no FD, onde uma métrica baseada nas condições de canal do UE será utilizada. Neste momento, pode ser utilizada a métrica do PF ou CoIta (*Carrier over Interference to Average*), que leva em conta a estimativa do SINR para o i-ésimo UE no k-ésimo RBG. Neste estudo considerou-se esta última.

2.1.7 **Channel and QoS-aware (CQA):** prioriza fluxos que possuem requisitos de QoS muito rígidos em termos de taxa de bits e atraso, como VoIP e vídeo conferência. O CQA (BOJOVIC; BALDO, 2014) leva em conta o atraso *head of line* (HOL), ou seja, o atraso do primeiro pacote a ser transmitido pelo UE; os parâmetros da taxa de bits garantida (GBR); e a qualidade do canal sobre as diferentes sub-bandas. No TD, a cada TTI, o CQA agrupa UEs por prioridade, considerando primeiro os fluxos com maior atraso HOL. Nesta métrica utiliza-se a razão entre o atraso $d_{HOL}^i(t)$ e o número de fluxos que serão considerados no escalonamento no FD. No FD, o CQA utiliza uma métrica que, além do atraso HOL, também considera outras duas métricas baseadas na GBR e na capacidade do canal de cada UE, conforme a Equação (6). A métrica m_{GBR}^i é a razão entre a taxa de bits garantida do UE 'i' e a sua última média da vazão atingida. Já métrica $m_{i,k}^{CA}$, pode ser baseada na métrica do PF ou no ganho de desvanecimento seletivo em frequência (*Frequency Selective Fading Gains*) no k-ésimo RB para o i-ésimo UE. Neste estudo considerou-se esta última.

$$m_{i,k(FD)}^{CQA} = d_{HOL}^i(t) * m_{GBR}^i(t) * m_{i,k}^{CA} \quad (6)$$

3. Parâmetros da Simulação

Os desempenhos dos algoritmos RR, BET, MT, PF, TTA, PSS e CQA sob diferentes cargas de tráfego foram avaliados utilizando a ferramenta de simulação de redes NS-3 (*Network Simulator*) (NS-3). Dois cenários foram utilizados:

Rede LTE com célula única: desenvolvido para avaliar a justiça na distribuição de recursos, envolve uma eNB e vários UEs conectados a esta. Os UEs são posicionados de maneira aleatória num raio de 500 m em torno da eNB, e se movimentam em velocidade constante de 60 km/h (modelo veicular). Optou-se por um cenário com apenas 1 eNB a fim de evitar processos de *handovers* ao longo da simulação.

Rede LTE heterogênea: desenvolvido para avaliar a vazão e a satisfação dos requisitos de QoS (atraso e *jitter*), contém várias eNBs e HeNBs, caracterizando um cenário heterogêneo. O cenário possui um *site*, com células setorizadas em 120°, totalizando três eNBs; dois blocos de apartamentos, cada um com duas HeNBs são posicionados aleatoriamente dentro da área de cobertura do sistema, totalizando quatro HeNBs. O *site* possui 500.000 m². Os UEs das HeNBs são posicionados dentro do raio de cobertura de cada uma delas e serão conectados às mesmas, com posicionamento constante. Já os UEs da eNBs serão posicionados de maneira aleatória dentro da área de cobertura do *site* e serão conectados às eNBs mais próximas; estes UEs se movimentam em velocidade constante de 60 km/h (modelo veicular).

Para a mobilidade dos usuários, no cenário da rede LTE com célula única, utilizou-se o modelo *ConstantVelocityMobilityModel* e, no cenário da rede LTE heterogênea, o modelo *SteadyStateRandomWayPointMobilityModel*. Ambos os modelos estão disponíveis no módulo LTE do NS-3. Para as aplicações de voz, vídeo e fluxo de melhor esforço, os tráfegos são gerados de acordo com o padrão OnOff descrito em (NS-3). Para a aplicação VoIP utilizou-se o codec G.279.

Para as macrocélulas, em todos os cenários, 40% dos UEs possuíam fluxo de vídeo, 40% dos UEs possuíam fluxo de VoIP e 20% dos UEs possuíam fluxo de melhor esforço. No primeiro cenário, tem-se três situações: 20, 30 e 40 UEs conectados à uma eNB. Já no cenário heterogêneo, tem-se quatro HeNBs, com 5 UEs conectados à cada uma durante toda a simulação; as HeNBs estão posicionadas dentro da área de cobertura do *site* com 3 eNBs, com 40, 60 ou 80 UEs conectados à *macrocell*. A interface X2 das eNBs estão ativas. Cada UE conectado à HeNB utiliza tráfego VoIP, Vídeo e fluxo de melhor esforço, simultaneamente. Assim avalia-se os algoritmos em um cenário com uma distribuição de serviços em que há mais usuários utilizando tráfego de tempo real do que tráfego de melhor esforço. Os parâmetros avaliados nestes cenários foram: vazão média, satisfação de QoS (atraso e *jitter*) e justiça.

Os resultados apresentados na próxima seção referem-se a quinze execuções para cada cenário individual, totalizando 45 repetições para um algoritmo em cada cenário, com o objetivo de produzir um intervalo de confiança de 95%. Em todos os cenários, considerou-se o desempenho da rede em relação ao número de UEs conectados. Para a análise da justiça, utilizou-se o Índice de Justiça de Jain (CHISUNG; DONG, 2007). Esse índice varia de 0 à 1, no qual quanto mais próximo de 1 melhor a justiça. Para a avaliação dos escalonadores, foram utilizados os algoritmos já implementados no módulo do LTE do simulador NS-3. Os desempenhos dos algoritmos foram avaliados aumentando-se o número de UEs, a fim de aumentar a carga de tráfego nas células. Os resultados apresentados a seguir, é a média obtida do total das simulações realizadas. Os demais parâmetros da simulação podem ser encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros da Simulação

Parâmetros	Rede LTE célula única	Rede LTE heterogênea
Largura de banda em número de RBs (eNB)	25	25
Largura de banda em número de RBs (HeNB)	-	15
Largura de banda em MHz (eNB)	5	5
Largura de banda em MHz (HeNB)	-	3
Potência de Transmissão da eNB	43 dBm	43 dBm
Potência de Transmissão da Home eNB	-	20 dBm
Layout da macrocélula	1 setor (antena omnidirecional)	3 setores (120°/setor)
Número de UEs (macrocélula)	20 – 30 - 40	40 - 60 - 80
Número de UEs (femtocélula)	-	20
Número Total de UEs	20 – 30 - 40	60 – 80 - 100
Modelo de desvanecimento	Veicular, à 60 km/h	Veicular, à 60 km/h
Modelo de propagação	<i>Cost231</i>	<i>HybridsBuildingsPropagation LossModel</i>
Tráfego de tempo real	VoIP, <i>Streaming</i> de Vídeo	VoIP, <i>Streaming</i> de Vídeo
Duração da simulação	30000 TTIs	30000 TTIs
Número de repetições	15	15

4. Resultados da Simulação e Análise

A Tabela 2 traz o índice de Justiça obtido no cenário da rede LTE de célula única. Dela, observa-se que o algoritmo BET apresenta os maiores índices de justiça nas três situações de tráfego, alcançando de perto o índice máximo. O algoritmo BET é seguido pelos algoritmos CQA, PSS, PF, TTA, RR e MT, nesta ordem.

Tabela 2 – Índice de Justiça

Cenário	Algoritmos							
	Número de UEs	MT	BET	CQA	PF	PSS	RR	TTA
20		0,268	0,999	0,959	0,877	0,946	0,788	0,869
30		0,234	0,999	0,960	0,920	0,945	0,821	0,836
40		0,199	0,999	0,950	0,895	0,914	0,786	0,829

O BET aloca recursos ao UE com a menor última média da vazão. Como inicialmente os UEs estão exatamente iguais quanto a esta métrica e a quantidade de UEs conectados à eNB é fixa durante toda a simulação, estas condições levam o algoritmo BET ao revezamento ótimo dos recursos disponíveis entre os UEs. Os algoritmos CQA e PSS alcançaram índices bastante semelhantes. Ambos, em suas políticas, priorizam os fluxos de tráfego que possuem requisitos de QoS mais rígidos. Neste cenário, 80% dos fluxos se encaixam neste perfil (*Streaming* de vídeo e VoIP). O PF e o TTA também alcançaram bons níveis de justiça ao utilizarem políticas que exploram a capacidade do canal associadas a estratégias que garantem serviço a todos os UEs conectados. É importante ressaltar que a eNB neste cenário possui uma largura de banda de 5 MHz (25 RBs) e no mínimo 20 UEs conectados. Vale lembrar que, utilizou-se a alocação tipo 0, logo há 12 RBGS disponíveis. Neste caso, o RR não possui recursos para todos os UEs em um só TTI e, mesmo buscando justiça, não segue um padrão de alocação durante toda a simulação. Quanto maior a quantidade de UEs para uma determinada largura de banda, maior o tempo de espera para o UE ser novamente escalonado. Nesta análise, o algoritmo menos justo foi o MT. Este resultado já era esperado pois, apesar de maximizar a vazão global da célula, o MT sempre aloca recursos aos UEs com melhores condições de canal, desempenhando uma partilha injusta

para com os UEs em condições desfavoráveis, como aqueles UEs que estão mais distantes da eNB. Observa-se ainda que o aumento na quantidade de UEs conectados, mantendo as mesmas proporções nos tipos de tráfego e o mesmo padrão de mobilidade, não altera, por si só, de forma significativa, os índices de justiça obtidos neste cenário.

A Figura 3 traz os resultados da vazão média para os tráfegos de vídeo e VoIP no cenário da rede LTE heterogênea.

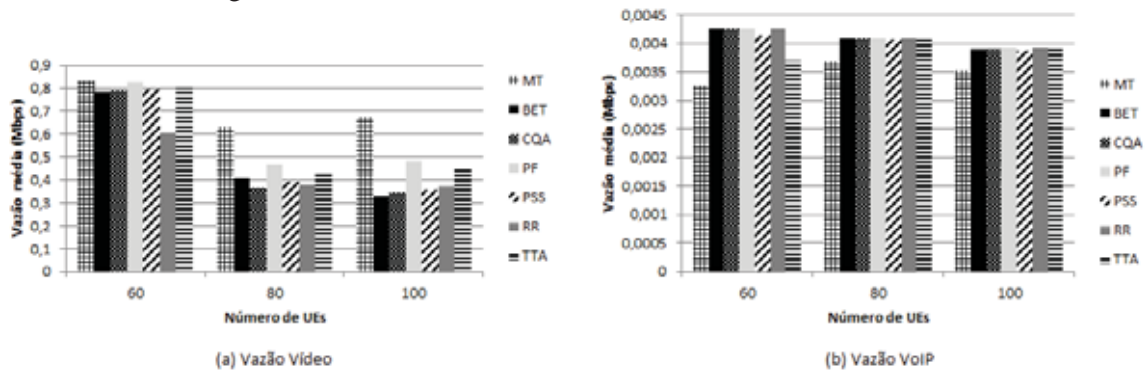


Figura 3 – Vazão dos fluxos de Vídeo e VoIP.

Para o tráfego de vídeo, verifica-se que o algoritmo MT obteve a maior média da vazão de dados, seguido pelo PF, TTA, CQA, PSS, BET e RR, nesta ordem. Estes resultados demonstram os objetivos alcançados pelas métricas de cada um deles. Como já mencionado, o MT, PF e TTA são algoritmos que se aproveitam das flutuações do canal para atribuir recursos aos usuários que melhor se beneficiariam com determinado(s) recurso(s) naquele instante. O principal objetivo desses algoritmos é maximizar a vazão global do sistema. O CQA e o PSS também se aproveitam das vantagens das condições do canal em seus estágios no domínio da frequência para melhor atribuir recursos aos UEs, também a fim de maximizar a vazão da célula. Já os algoritmos BET e RR apenas objetivam alcançar justiça, sem considerar qualquer outra métrica que venha a propiciar uma melhor eficiência espectral.

A Figura 3 (b) mostra os resultados da vazão média obtida para o tráfego VoIP. Para esta aplicação, nota-se uma equiparação de resultados. Isto se dá devido, principalmente, à pequena taxa de bits que esse tipo de fluxo requer e, portanto, não necessita da alocação de muitos recursos para alcançá-la. Observa-se, no entanto que, contrário ao resultado da vazão para o tráfego de vídeo, o MT é quem possui a menor vazão de dados em todas as três situações de carga. Isto se dá ao fato de que o MT não garante que todos os UEs conectados serão servidos pelo menos com um nível mínimo de serviço, desconsiderando os UEs que experimentam péssimas condições de canal durante todo o período analisado. Nota-se ainda que, para ambas as aplicações, ao aumentar o número de UEs na rede, a vazão média de dados diminuiu, mesmo que discretamente. Isto se justifica pela competição maior entre os UEs pela mesma quantidade de recursos disponível.

A Figura 4 apresenta o atraso médio para os tráfegos de vídeo e VoIP na rede LTE heterogênea. Nota-se que quando usado o algoritmo MT, o atraso médio obtido foi muito alto, bem acima do limite indicado pelo QCI (*QoS Class Identifier*) para a classe de videoconferência, que é de no máximo 150 ms (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011). Este resultado se dá ao se considerar a média da medida do atraso para todos os UEs analisados e, novamente, é fruto dos fatores já citados anteriormente relacionados à justiça e a não garantia de serviço para todos os UEs que solicitam serviço. Para os outros escalonadores, observa-se também um ligeiro aumento nas medidas do atraso ao aumentar o número de UEs na rede. Da Figura 4 (a), é possível verificar que as medidas do atraso médio obtidas com o uso dos outros algoritmos estão de acordo com o limite indicado pelo QCI em todas as situações analisadas, exceto o algoritmo BET na situação de maior carga (100 UEs). Para os fluxos VoIP, observou-se um comportamento muito semelhante aos resultados obtidos para o fluxo de vídeo, conforme mostra a Figura 4 (b). Com

exceção do MT, todos os outros algoritmos apresentaram atraso médio bem abaixo do limite indicado no QCI, que é de 100 ms.

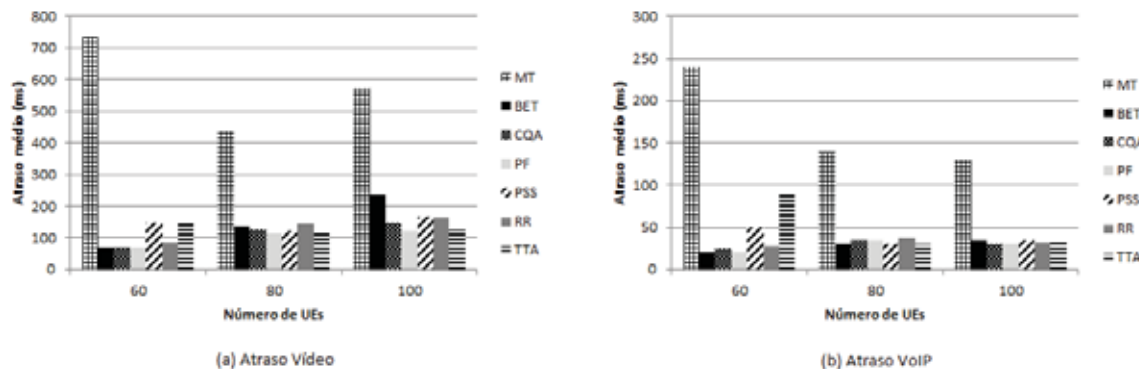


Figura 4 – Atraso para os fluxos de Vídeo e VoIP.

Salvo para o MT, em ambas as aplicações, obteve-se baixos níveis de *jitter*, ficando sempre menor que 20 ms. A análise para o *jitter* é bem semelhante à análise realizada para o atraso médio. Devido a isto, não serão incluídos neste documento os gráficos apresentando o *jitter* médio obtido. Vale lembrar que se o *jitter* for muito grande, mesmo o atraso se mantendo dentro dos limites aceitáveis, a qualidade da comunicação vai decrescer até se tornar impossível, por isso esta métrica foi também considerada neste estudo.

Quanto à complexidade, aqui se faz uma análise qualitativa do custo computacional dos algoritmos. Zhou, Baldo e Miozzo (2013) afirmam que os algoritmos que exploram a capacidade do canal alcançam melhor eficiência espectral, porém essa granularidade mais fina acarreta num custo computacional maior. Sabe-se ainda que, o custo computacional de um algoritmo se dá, no geral, em torno do tempo de processamento (número de passos) e da memória exigida (HAN; ARMOUR, 2012). Assim, algoritmos que realizam o escalonamento em dois estágios (no domínio do tempo e da frequência), por exemplo, exigem uma complexidade maior de implementação. Como já visto, o escalonamento muitas vezes se dá a partir de métricas identificados através de medidas feitas na eNB e/ou reportados pelos UEs, como o CQI e o BSR, além de requisitos de QoS. Assim, quanto maior a demanda de relatórios e, por sua vez, o cálculo de n-métricas a fim de se obter a alocação de recursos, maior será o consumo de memória e o tempo de processamento. Ressalta-se aqui que, neste contexto, esse custo computacional aumenta proporcionalmente ao número de usuários conectados, lembrando ainda que se trata de um ambiente sem fio, passível de alta mobilidade, portanto, estes relatórios e métricas também devem ser atualizados a cada TTI.

Assim, conclui-se que o algoritmo RR possui baixa complexidade de implementação, pois é independente do canal e não utiliza nenhuma métrica específica. Embora seja independente do canal, o BET possui média complexidade ao utilizar a última média da vazão atingida como métrica e, sobretudo, devido à necessidade de atualizá-la para cada RBG num mesmo TTI, até que todos os RBGs sejam alocados. O MT é dependente do canal e utiliza como métrica a vazão atingível para toda a largura de banda, atualizando esta métrica apenas uma vez num mesmo TTI para cada UE, possuindo, assim, média complexidade de implementação. Já o PF possui uma complexidade maior que o MT pois além de utilizar a vazão atingível para toda a largura de banda, também utiliza a média da vazão atingida, usando como métrica a razão entre essas duas medidas. Essa métrica é atualizada uma vez, para cada UE, num mesmo TTI. O TTA, por sua vez, possui maior complexidade computacional ao ser comparado ao PF ao utilizar como métrica a razão entre as medidas da vazão atingível em um RB específico e a vazão atingível para toda a largura de banda. Assim, o TTA, calcula essa métrica para cada UE em relação a cada RB disponível. O algoritmo PSS possui alta complexidade pois, além de ser dependente do canal, também é baseado nos requisitos de QoS do fluxo. O PSS no TD, usa como métrica uma Taxa de Bits Alvo (TBR) e, a partir dela, classifica os UEs em dois grupos, aplicando métricas diferentes

a cada grupo. Ao passar o SCS para o FD, o PSS calcula uma nova métrica, agora baseada nas condições do canal e, enfim, os recursos são alocados. Semelhante ao PSS, CQA também é dependente do canal e baseado em QoS. No TD, sua métrica é baseada no atraso HOL de cada fluxo. Já no FD, o CQA calcula uma nova métrica, que, por sua vez, é fruto de outras duas métricas multiplicadas pelo atraso HOL: uma baseada na GBR e outra baseada nas condições de canal do UE, o que acarreta num custo computacional ainda maior quando comparado ao PSS.

5. Conclusão

O objetivo deste trabalho foi fornecer uma avaliação de desempenho de várias classes de algoritmos de escalonamento de recursos em redes LTE heterogêneas. Sete algoritmos de escalonamento foram selecionados para este estudo e avaliados por meio de simulações via *software* NS-3. Esta escolha se deu devido ao ótimo suporte oferecido para simulações de redes LTE. Os algoritmos analisados foram: *Round Robin*, *Proportional Fair*, *Maximum Throughput*, *Blind Equal Throughput*, *Throughput to Average*, *Priority Set* e *Channel and QoS Aware*. Os desempenhos dos sete algoritmos foram avaliados e comparados em termos da vazão, atraso, *jitter*, justiça e complexidade computacional. A avaliação de desempenho foi feita a partir dos resultados obtidos para os tráfegos de VoIP e *streaming* de vídeo.

Esse trabalho providenciou uma abrangente revisão acerca das diferentes estratégias de alocação de recursos nas redes LTE. Observou-se que algoritmos que são independentes do canal, atingem menor vazão de dados, ao desprezarem as mudanças e particularidades das condições de canal dos UEs. Assim, apesar da menor complexidade de implementação, este tipo de abordagem deve ser evitada em redes sem fio, onde as condições de canal dos usuários mudam instantaneamente. Ao contrário, algoritmos dependentes do canal podem atingir um melhor desempenho, tirando proveito da diversidade multiusuário, alcançando uma melhor eficiência espectral e melhores taxas de transmissão com os mesmos recursos. Apesar de mais eficiente, esta estratégia acarreta num maior custo computacional, que cresce proporcionalmente ao número de usuários conectados e à quantidade de métricas e relatórios necessários.

Esta avaliação não apenas analisou o impacto das estratégias de escalonamento de recursos do ponto de vista da qualidade de serviço oferecida aos usuários da rede, mas também abordou o ponto de vista do operador da rede, que precisa otimizar seus recursos de rádio e *hardware*. Ressalta-se ainda que, a abordagem aqui realizada é importante para tomar decisões no projeto de escalonadores de recursos no LTE, onde a escolha de cada critério pode impactar no desempenho global da rede, por isso deve estar em conformidade com os objetivos da operadora, existindo assim um *trade-off* entre QoS e complexidade computacional, que precisa ser bem avaliado.

Como possíveis desdobramentos deste trabalho, inclui-se: a análise quantitativa do custo computacional dos algoritmos, bem como estimativas da eficiência espectral, a fim de garantir uma análise ainda mais completa; a realização de novos estudos, com algoritmos diferentes e novos cenários, dando ênfase à pesquisa de algoritmos que possuem grande potencial de uso pelos fabricantes de equipamentos. Tais estratégias podem ser tratadas como continuidade deste trabalho.

Agradecimentos

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

Referências

- Afroz, F.; Sandrasegaran, K.; Ghosal, P.** (2014), Performance Analysis of PF, M-LWDF and EXP/PF Packet Scheduling Algorithms in 3GPP LTE Downlink, GC'12 Workshop: Quality of Experience for Multimedia Communications, 87-92.
- Ali-Yahiya, T.** (2011) Understanding LTE and its Performance, Springer, 1st. Edition, USA.

- Bendaoud, F.; Abdennebi, M.; Didi, F.** (2014), Survey On Scheduling And Radio Resources Allocation In Lte, *International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN)* Vol.6, No.1, 17-29.
- Bojovic, B.; Baldo, N.** (2014), A new Channel and QoS Aware Scheduler to enhance the capacity of Voice over LTE systems, *Proceedings of 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, 1-6.
- Brydon, A.** (2012), Summary of 3GPP Standards Releases for LTE, (<http://www.unwiredinsight.com/2012/3gpp-lte-releases>), 01, 2015.
- Cai, R.; Wang, X.; Wang, Y.; Xiao, S.; Wang, C.; Wang, W.** (2014), A Novel and Effective User Scheduling Scheme for Heterogeneous Scenario in LTE-A System, *International Conference on Computer and Information Technology*, 679-683.
- Capozzi, F.; Piro, G.; Grieco, L. A.; Boggia, G.; Camarda, P.** (2012), Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey, *IEEE Comm. Surveys and Tutorials*, Volume 15, No 2, 678-700.
- Chisung, B.; Dong, C.** (2007), Fairness-Aware Adaptive Resource Allocation Scheme in Multihop OFDMA System, *Communication letters IEEE*, 134-136.
- Dahlman, E., Parkvall, S.; Sköld, J.** (2011), *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, Elsevier, 1st. Edition, UK.
- Dardouri, S.; Bouallegue, R.** (2014), Performance Analysis of Resource Scheduling in Lte Femtocells Networks, *The Sixth International Conference on Networks & Communications*.
- Han, C.; Armour, S.** (2012), Computational Complexity and Energy Consumption Analysis of Dynamic Resource Scheduling Algorithms for LTE, *75th Vehicular Technology Conference VTC Spring*, 1-5.
- Kela, P.; Puttonen, J.; Kolehmainen, N.; Ristaniemi, T.; Henttonen, T.; Moisio, M.** (2008), Dynamic Packet Scheduling Performance in UTRA Long Term Evolution Downlink, *International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, 308-313.
- Kwan, R.; Leung, C.** (2010), A Survey of Scheduling and Interference Mitigation in LTE, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Volume 2010, Article ID 273486, 10 pages.
- Magalhães, J.; Guardieiro, P. R.** (2014), Proposta de um Mecanismo de Escalonamento em Dois Estágios para o Tráfego de Aplicações em Tempo Real para Redes LTE, *32º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos SBRC*, 251-264.
- Monghal, G.; Pedersen, K. I.; Kovacs I. Z.; Mogensen, P. E.** (2008), QoS Oriented Time and Frequency Domain Packet Schedulers for The UTRAN Long Term Evolution, *Vehicular Technology Conference VTC Spring*, 2532 – 2536.
- NS-3**, (<http://www.nsnam.org/>), 01, 2015.
- Nurcahyani, I.; Mustika, I. W.; Selo** (2014), Performance Analysis of Packet Scheduling Algorithm for Video Service in Downlink LTE, *International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems ICSGTEIS*, 52-57.
- Sesia S.; Toufik, I.; Baker, M.** (2011), *LTE–The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, Wiley, 2nd Edition, UK.
- Singh, D.; Singh, P.** (2013), Radio Resource Scheduling in 3GPP LTE: A Review, *International Journal of Engineering Trends and Technology IJETT*, Volume 4, 2405-2411.
- Trivedi, R. D. e Patel, M. C.** (2014), Comparison of Different Scheduling Algorithm for LTE, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 4, 334-339.
- Wannstrom, J.; Mallinson, K.** (2013), *Heterogeneous Networks in LTE*. Disponível em: (<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/1576-hetnet/>), 01, 2015.
- Uckelmann, D., Harrison; M., Michahelles, F.** (2011), *An Architectural Approach Towards the Future Internet of Things*, Springer Berlin Heidelberg.
- Zhou, D.; Baldo, N.; Miozzo, M.** (2013), Implementation and Validation of LTE Downlink Schedulers for ns-3, *6th International Conference on Simulation Tools and Techniques ICST*, 211-218.