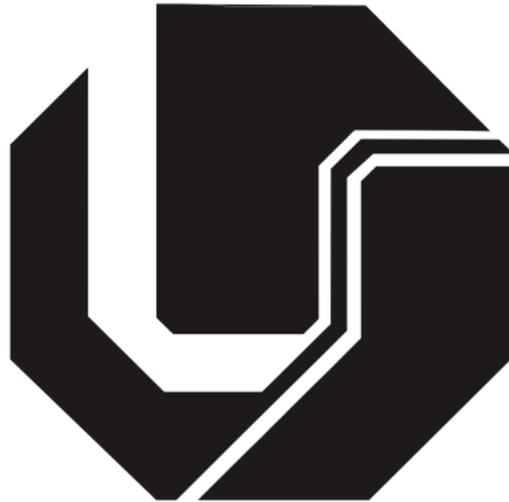


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**UM ALGORITMO DE CAC COM RESERVA DINÂMICA
DE RECURSOS E PREEMPÇÃO PARA REDES LTE**

Gustavo Lopes Camargos

Uberlândia - 2019

Gustavo Lopes Camargos

**UM ALGORITMO DE CAC COM RESERVA DINÂMICA
DE RECURSOS E PREEMPÇÃO PARA REDES LTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências

Paulo Roberto Guardieiro, Dr. - Orientador (UFU)

Ederson Rosa da Silva, Dr. (UFU)

Saulo Henrique da Mata, Dr. (IFTM)

Uberlândia - 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

C172a Camargos, Gustavo Lopes, 1981-
2019 Um algoritmo de CAC com reserva dinâmica de recursos e preempção
para redes LTE [recurso eletrônico] / Gustavo Lopes Camargos. - 2019.

Orientador: Paulo Roberto Guardieiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3906>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. Guardieiro, Paulo Roberto, 1952-, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU:621.3

Gustavo Lopes Camargos

**UM ALGORITMO DE CAC COM RESERVA DINÂMICA
DE RECURSOS E PREEMPÇÃO PARA REDES LTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências

Prof. Paulo Roberto Guardieiro, Dr.
Orientador

Prof. José Roberto Camacho, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

| | | | | | |
|------------------------------------|---|-----------------|-------|-----------------------|-------|
| Programa de Pós-Graduação em: | Engenharia Elétrica | | | | |
| Defesa de: | Dissertação de Mestrado Acadêmico, 723, PPGEELT | | | | |
| Data: | Dois de dezembro de dois mil e dezenove | Hora de início: | 14:00 | Hora de encerramento: | 17:03 |
| Matrícula do Discente: | 11522EEL006 | | | | |
| Nome do Discente: | Gustavo Lopes Camargos | | | | |
| Título do Trabalho: | Um algoritmo de CAC com reserva dinâmica de recursos e preempção para redes LTE | | | | |
| Área de concentração: | Processamento da informação | | | | |
| Linha de pesquisa: | Redes de computadores | | | | |
| Projeto de Pesquisa de vinculação: | Programa: ENGENHARIA ELÉTRICA (32006012001P9). Nome: OBTENÇÃO DE QUALIDADE DE SERVIÇO EM REDES DE ACESSO BANDA LARGA SEM FIO IEEE 802.16 (WIMAX). Data de Início: 01/01/2007. Natureza do Projeto: PESQUISA. Situação do Projeto: EM ANDAMENTO | | | | |

Reuniu-se no Anfiteatro 1E, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Éderson Rosa da Silva - FEELT/UFU; Saulo Henrique da Mata - IFTM; Paulo Roberto Guardieiro - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Paulo Roberto Guardieiro, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimeada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Superior, em 03/12/2019, às 08:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Saulo Henrique da Mata, Usuário Externo**, em 03/12/2019, às 09:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ederson Rosa da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/12/2019, às 13:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1674704** e o código CRC **1EE2E48E**.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus por me dar força, saúde e serenidade na superação dos desafios impostos pelo mestrado. Sem ele, nada disso seria possível.

Agradeço a todos os professores das disciplinas, especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Guardieiro por exigir de mim muito mais do que eu imaginava ser capaz de fazer. Obrigado pela orientação, pelo amparo, pelas correções e por toda a orientação que certamente facilitou a condução deste projeto. Fica aqui registrada a minha gratidão.

Agradeço a minha mãe Manoelina pelo incentivo nos momentos difíceis de cansaço e desânimo. Ao meu querido irmão Guilherme por ser tão companheiro e parceiro. Ao meu pai Alair, pelo exemplo e pelos valores que me ensinou. Tenho certeza de que o senhor me olha de algum lugar.

Agradeço aos meus colegas de laboratório, Carlos Langoni, Einar César e André Barbosa pelo companheirismo, amizade e incentivo nos momentos críticos de obtenção de resultados. E agradeço a todos os colegas dos outros laboratórios que me ajudaram de alguma forma para a realização deste projeto.

Agradeço à equipe de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU pela paciência e confiança na execução e conclusão deste projeto.

E por fim, agradeço a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro concedido para a viabilização deste trabalho.

" A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo".

Albert Einstein

Resumo

Camargos, G. L., UM ALGORITMO DE CAC COM RESERVA DINÂMICA DE RECURSOS E PREEMPÇÃO PARA REDES LTE, UFU, Uberlândia, Brasil, 2019, 95p.

A tecnologia *Long Term Evolution* (LTE) foi idealizada pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) com o intuito de proporcionar aos seus usuários maiores taxas de transferência de dados e uma qualidade de experiência mais satisfatória.

A garantia de qualidade de serviço (QoS) aos usuários se tornou parte importante no desenvolvimento da tecnologia LTE, já que é essencial para a disponibilidade de aplicações, tais como voz e vídeo, cuja demanda é cada vez crescente. Em redes LTE, a QoS é garantida a partir do Gerenciamento de Recursos de Rádio (RRM), através de algoritmos que regem a maneira pela qual os recursos finitos da rede são compartilhados entre todos os usuários.

Dentre os algoritmos RRM, o CAC - *Call Admission Control* é um dos mais relevantes: ele toma a decisão de admitir ou rejeitar uma conexão, tomando por base a natureza da conexão, seus requisitos de QoS e a taxa de ocupação da rede. Uma vez que é impraticável a admissão de toda a demanda das conexões, seu objetivo é garantir que os recursos de rádio sejam utilizados de maneira otimizada, de forma a suprir os requisitos de QoS das conexões admitidas, esperando assim que o usuário tenha uma qualidade de experiência satisfatória.

Pelo fato do padrão LTE não especificar mecanismos para admissões de conexões, propõe-se neste trabalho um algoritmo de controle de admissão de chamadas (CAC), capaz de atender as principais classes de serviços definidas pelo padrão. A estratégia do algoritmo de CAC apresentada neste trabalho prioriza conexões GBR e conexões em *handoff* (chamadas que já estão em andamento) através da adaptação dinâmica de seções reservadas da largura de banda e preempção de conexões non-GBR, que são mais tolerantes à redução de taxa de dados.

A avaliação da eficiência do algoritmo de CAC proposto foi feita através de modelagem e simulação em um cenário tipicamente urbano. Seus resultados foram comparados com os resultados de outros algoritmos de CAC encontrados na literatura e bastante populares, que também foram modelados no mesmo cenário.

Os resultados das simulações mostram que as funções implementadas no algoritmo foram capazes de apresentar uma redução considerável da taxa de perdas de conexões e aumento no número de conexões admitidas.

Palavras-chave: 3GPP LTE, QoS, Controle de Admissão de Chamadas, CAC, chamadas em *handoff*, preempção.

Abstract

Camargos, G. L., A CAC ALGORITHM WITH DYNAMIC RESOURCE RESERVATION AND PREEMPTION FOR LTE NETWORKS, UFU, Uberlandia, Brazil, 2019, 95p.

Long Term Evolution (LTE) technology was devised by the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) to provide its users with higher data transfer rates and a more satisfying quality of experience.

The guarantee of quality of service (QoS) to users has become an important part of the development of LTE technology, as it is essential for the availability of applications such as voice and video, which are increasingly in demand. In LTE networks, QoS is guaranteed from Radio Resource Management (RRM), through algorithms that lead how finite network resources are shared among all users.

Among the RRM algorithms, CAC - Call Admission Control is one of the most relevant: it takes the decision to admit or reject a connection, based on the type of the connection, your requirements of QoS and the network occupancy rate. Since it is impractical to admit all connection requests, it aims to assure that radio resources are used optimally to meet the QoS requirements of the admitted connections, thus expecting the user to have a satisfactory quality of experience.

Because the LTE standard does not specify mechanisms for connection admissions, it is proposed in this work a call admission control algorithm (CAC), capable of attending the main classes of services defined by the standard. The strategy of the CAC algorithm presented in this work prioritizes GBR connections and handoff connections (calls that are already in progress) through the dynamic adaptation of reserved sections of the bandwidth and preemption of nonGBR connections, which are more tolerant to the reduction of data rate.

The evaluation of the efficiency of the proposed CAC algorithm was done through modeling and simulation in a typically urban scenario. Their results were compared with the results of other CAC algorithms found in the literature and quite popular, which were also modeled in the same scenario.

Simulation results show that the functions implemented in the algorithm were able to present a considerable reduction in the rate of connection drops and increase in the number of admitted connections.

Keywords: 3GPP LTE network, QoS, Call Admission Control, CAC, handoff calls, preemption.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1 Definição do Problema e Solução Proposta..... | 2 |
| 1.2 Metas e Objetivos..... | 3 |
| 1.3 Estrutura da Dissertação..... | 4 |
| | |
| 2. Visão Geral das Redes LTE..... | 6 |
| 2.1 Introdução às Redes de Acesso sem Fio 4G..... | 6 |
| 2.2 A Necessidade do LTE..... | 7 |
| 2.3 Arquitetura de Alto Nível do LTE..... | 8 |
| 2.3.1 Arquitetura da Rede de Acesso a Rádio – E-UTRAN..... | 8 |
| 2.3.2 <i>User Equipment (UE)</i> | 9 |
| 2.3.3 Arquitetura da Rede de Núcleo (<i>Core Network</i>)..... | 10 |
| 2.3.3.1 P-GW – <i>Packet Data Network Gateway</i> | 11 |
| 2.3.3.2 S-GW – <i>Serving Gateway</i> | 12 |
| 2.3.3.3 MME – <i>Mobility Management Entity</i> | 12 |
| 2.3.3.4 HSS – <i>Home Subscriber Server</i> | 12 |
| 2.3.3.5 Outros Elementos do EPC..... | 13 |
| 2.4 Arquitetura da Interface Aérea..... | 13 |
| 2.4.1 Protocolo PDCP - <i>Packet Data Convergence Protocol</i> | 14 |
| 2.4.2 Protocolo RLC – <i>Radio Link Control</i> | 15 |
| 2.4.3 Protocolo MAC – <i>Medium Access Control</i> | 16 |
| 2.4.3.1 Canais Lógicos..... | 17 |
| 2.4.3.2 Canais de Transporte..... | 18 |
| 2.4.4 A Camada Física..... | 19 |
| 2.4.4.1 Canais Físicos de Dados..... | 19 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.4.4.2 | Informações de Controle, Canais Físicos de Controle e Sinais da Camada Física..... | 20 |
| 2.4.4.3 | Princípios do OFDMA e SC-FDMA | 21 |
| 2.4.4.4 | Modos de Multiplexação TDD e FDD..... | 23 |
| 2.5 | Qualidade de Serviço em Redes LTE..... | 24 |
| 2.6 | Considerações Finais | 27 |
| 3. | Controle de Admissão de Chamadas em Sistemas LTE | 28 |
| 3.1 | Introdução | 28 |
| 3.2 | Noções Gerais sobre CAC | 29 |
| 3.3 | Modelo Geral de um algoritmo de CAC..... | 31 |
| 3.3.1 | Gerenciamento de Informações | 31 |
| 3.3.2 | Reserva de Recursos..... | 31 |
| 3.3.3 | Controle de Admissão | 32 |
| 3.4 | Projeto de um Esquema CAC..... | 32 |
| 3.5 | Classificação dos Controles de Admissão | 34 |
| 3.5.1 | Abordagem Centralizada e Distribuída | 34 |
| 3.5.2 | Abordagem baseada em padrão de tráfego e baseada em medições..... | 35 |
| 3.5.3 | Abordagem baseada na Granularidade do Controle de Recursos..... | 35 |
| 3.6 | Principais critérios para Admissão de Conexões | 36 |
| 3.7 | Preempção de Conexões | 40 |
| 3.8 | Vantagens do Uso de Controle de Admissão de Chamadas | 41 |
| 3.8.1 | Garantia de QoS..... | 41 |
| 3.8.2 | Receita da Operadora | 41 |
| 3.8.3 | Priorização de Serviços e Classes de Usuários..... | 42 |
| 3.8.4 | Compartilhamento Justo de Recursos | 42 |
| 3.9 | Considerações Finais | 42 |

| | |
|---|----|
| 4. Uma Proposta de Algoritmo de CAC com Reserva Dinâmica Preempção para Redes LTE | 44 |
| 4.1 Introdução | 44 |
| 4.2 Descrição do Problema | 45 |
| 4.3 Solução Proposta | 45 |
| 4.4 Proposta do Algoritmo de CAC | 46 |
| 4.4.1 Determinação da Eficiência Espectral da chamada..... | 48 |
| 4.4.2 Estimativa de Recursos..... | 52 |
| 4.4.3 Alocação Dinâmica de Recursos..... | 53 |
| 4.4.3.1 Admissão de uma chamada em <i>handoff</i> | 55 |
| 4.4.3.2 Admissão de uma chamada GBR | 56 |
| 4.4.3.3 Admissão de uma chamada non-GBR | 58 |
| 4.5 Execução da Preempção | 60 |
| 4.6 Considerações Finais | 61 |
| 5. Avaliação de Desempenho do Algoritmo de CAC Proposto | 63 |
| 5.1 Introdução | 63 |
| 5.2 Modelagem e Simulação | 64 |
| 5.2.1 Ferramenta de Simulação | 64 |
| 5.2.2 Ambiente e Parâmetros de Simulação..... | 65 |
| 5.3 Outros Algoritmos de CAC analisados..... | 68 |
| 5.3.1 <i>Basic CAC</i> | 69 |
| 5.3.2 <i>MSCAC – Multi Service CAC</i> | 69 |
| 5.3.3 <i>FCAC-P - Flexible CAC with Preemption</i> | 71 |
| 5.3.4 Algoritmo de CAC com Reserva Estática de Recursos | 72 |
| 5.4 Resultados Experimentais | 72 |

| | |
|--|----|
| 5.4.1 Avaliação dos Algoritmos de CAC em relação à probabilidade de perda de chamadas em <i>handoff</i> | 73 |
| 5.4.2 Avaliação dos Algoritmos de CAC em relação à probabilidade de bloqueio de chamadas | 76 |
| 5.4.3 Avaliação dos Algoritmos de CAC em relação ao total de chamadas admitidas | 78 |
| 5.4.4 Avaliação dos Algoritmos de CAC em relação ao número total de conexões admitidas por tipo de conexão | 80 |
| 5.5 Considerações Finais | 85 |
| 6. Conclusões Gerais..... | 87 |
| Referências Bibliográficas | 90 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Interconexões entre eNodeBs e EPC..... | 9 |
| 2.2 | Arquitetura da rede de núcleo com seus principais nós | 11 |
| 2.3 | Arquitetura de Protocolos da E-UTRAN | 14 |
| 2.4 | Esquematização de um <i>Physical Resource Block</i> (adaptada de [4])..... | 22 |
| 2.5 | Modelo de <i>bearers</i> na Arquitetura LTE..... | 25 |
| | | |
| 3.1 | Principais componentes de um algoritmo de CAC | 32 |
| 3.2 | Classificação de algoritmos de CAC (Adaptada de [41]) | 34 |
| | | |
| 4.1 | Distribuição Inicial dos Recursos da rede LTE..... | 46 |
| 4.2 | Cenário 1 para alocação dinâmica em chamadas em <i>handoff</i> | 55 |
| 4.3 | Cenário 2 para alocação dinâmica em chamadas em <i>handoff</i> | 55 |
| 4.4 | Cenário 1 para alocação dinâmica em chamadas GBR..... | 57 |
| 4.5 | Cenário 2 para alocação dinâmica em chamadas GBR..... | 57 |
| 4.6 | Cenário 1 para alocação dinâmica em chamadas non-GBR | 58 |
| 4.7 | Cenário 2 para alocação dinâmica em chamadas non-GBR | 59 |
| | | |
| 5.1 | Cenário de rede considerado da simulação | 66 |
| 5.2 | Distribuição de recursos nas seções do algoritmo MSCAC..... | 70 |
| 5.3 | Comparação entre as probabilidades de perdas dos diferentes algoritmos de CAC | 74 |
| 5.4 | Comparação entre as probabilidades de bloqueios dos diferentes algoritmos de CAC | 77 |
| 5.5 | Número de conexões totais admitidas x tempo de simulação | 79 |
| 5.6 | Chamadas VoIP admitidas x bloqueadas x perdas..... | 81 |
| 5.7 | Conexões de vídeo admitidas x bloqueadas x perdas | 82 |
| 5.8 | Conexões non-GBR admitidas x bloqueadas x perdas | 84 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Tabela de Categorias dos UEs (adaptada de [19]) | 10 |
| 2.2 | Características Padronizadas dos Valores de QCI | 26 |
| 4.1 | Tabela de CQI e Índice MCS (extraída de [56]) | 49 |
| 4.2 | Tabela de Índices MCS e TBS (extraída de [56]) | 50 |
| 4.3 | Notações utilizadas nos pseudo-códigos das funções do algoritmo de CAC..... | 54 |
| 5.1 | Parâmetros utilizados nas simulações | 67 |
| 5.2 | Parâmetros gerais das Aplicações | 68 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | |
|--------|--|
| 3GPP | <i>3rd Generation Partnership Project</i> |
| AC | <i>Admission Control</i> |
| AMC | <i>Adaptive Modulation and Coding</i> |
| APN | <i>Access Point Name</i> |
| ARP | <i>Allocation & Retention Priority</i> |
| ARQ | <i>Automatic Repeat Request</i> |
| AS | <i>Access Stratum</i> |
| BCAC | <i>Basic CAC</i> |
| BCCH | <i>Broadcast Control Channel</i> |
| BCH | <i>Broadcast Channel</i> |
| CAC | <i>Call Admission Control</i> |
| CBC | <i>Cell Broadcast Centre</i> |
| CCCH | <i>Common Control Channel</i> |
| CFI | <i>Control Format Indicators</i> |
| CP | <i>Cyclic Prefixes</i> |
| CQI | <i>Channel Quality Indicator</i> |
| CRC | <i>Cyclic Redundancy Check</i> |
| DCCH | <i>Dedicated Control Channel</i> |
| DCI | <i>Downlink Control Information</i> |
| DL-SCH | <i>Downlink Shared Channel</i> |
| DTCH | <i>Dedicated Traffic Channel</i> |
| E-RAB | <i>Evolved Radio Access Bearer</i> |

| | |
|---------|---|
| E-UTRAN | <i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i> |
| EIR | <i>Equipment Identity Register</i> |
| eNB | <i>Evolved Node B</i> |
| eNodeB | <i>Evolved Node B</i> |
| EPC | <i>Evolved Packet Core</i> |
| EPS | <i>Evolved Packet System</i> |
| ETWS | <i>Earthquake and Tsunami Warning System</i> |
| FCAC-P | <i>Flexible CAC with Preemption</i> |
| FDD | <i>Frequency Division Duplex</i> |
| FEC | <i>Forward Error Correction</i> |
| HARQ | <i>Hybrid Automatic Repeat Request</i> |
| HI | <i>Hybrid ARQ Indicator</i> |
| HC | <i>Handoff Calls</i> |
| HSPA | <i>High Speed Packet Access</i> |
| HSS | <i>Home Subscriber Server</i> |
| ISI | <i>Inter-symbol Interference</i> |
| LTE | <i>Long Term Evolution</i> |
| MAC | <i>Medium Access Control</i> |
| MBMS | <i>Multimedia Broadcast/Multicast Service</i> |
| MCCH | <i>Multicast Control Channel</i> |
| MCH | <i>Multicast Channel</i> |
| MCS | <i>Modulation and Coding Scheme</i> |
| MME | <i>Mobility Management Entity</i> |
| MIB | <i>Master Information block</i> |
| MSCAC | <i>Multi-service CAC</i> |

| | |
|-------|--|
| MT | <i>Mobile Termination</i> |
| MTCH | <i>Multicast Traffic Channel</i> |
| NAS | <i>Non-access Stratum</i> |
| NC | <i>New Calls</i> |
| OFDMA | <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> |
| P-GW | <i>Packet Data Network Gateway</i> |
| PBCH | <i>Physical Broadcast Channel</i> |
| PCC | <i>Policy and Charging Control</i> |
| PCCH | <i>Paging Control Channel</i> |
| PCH | <i>Paging Channel</i> |
| PCRF | <i>Policy Control and Charging Rules Function</i> |
| PDCP | <i>Packet Data Convergence Protocol</i> |
| PDN | <i>Packet Data Network</i> |
| PDSCH | <i>Physical Downlink Shared Channel</i> |
| PMCH | <i>Physical Multicast Channel</i> |
| PRACH | <i>Physical Random Access Channel</i> |
| PRB | <i>Physical Resource Block</i> |
| PUSCH | <i>Physical Uplink Shared Channel</i> |
| QCI | <i>QoS Class Identifier</i> |
| QoS | <i>Quality of Service</i> |
| RACH | <i>Random Access Channel</i> |
| RAN | <i>Radio Access Network</i> |
| RLC | <i>Radio Link Control</i> |
| RRM | <i>Radio Resource Management</i> |
| S-GW | <i>Serving Gateway</i> |

| | |
|---------|--|
| S1-C | <i>S1 control plane part</i> |
| S1-U | <i>S1 user plane part</i> |
| SAE | <i>System Architecture Evolution</i> |
| SC-FDMA | <i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> |
| SIB | <i>System Information block</i> |
| SINR | <i>Signal-to-interference plus noise ratio</i> |
| TB | <i>Transport Block</i> |
| TBS | <i>Transport Block Size</i> |
| TDD | <i>Time Division Duplex</i> |
| TE | <i>Terminal Equipment</i> |
| TTI | <i>Transmission Time Interval</i> |
| UCI | <i>Uplink Control Information</i> |
| UE | <i>User Equipment</i> |
| UL-SCH | <i>Uplink Shared Channel</i> |
| VoIP | <i>Voice over IP</i> |
| VoLTE | <i>Voice over LTE</i> |

Capítulo 1

Introdução

A demanda cada vez mais crescente por serviços de informação capazes de serem executados a qualquer hora e em qualquer lugar levaram ao desenvolvimento de novas tecnologias [1]. As gerações anteriores de redes móveis celulares, tais como *Global System for Mobile Communications* (GSM) e *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), se mostraram incapazes de se adaptar a essa realidade devido ao número cada vez maior de usuários associado aos requisitos de *Quality of Service* (QoS) que as novas aplicações exigem para serem executadas de maneira adequada.

A tecnologia LTE foi desenvolvida com o propósito de oferecer soluções para lidar com essa demanda. Criada pelo *Third Generation Partnership Project* (3GPP), o LTE é a evolução do UMTS, embora atualmente eles tenham muito pouco em comum [2]. A evolução da tecnologia de acesso via rádio proposta pelo LTE, a *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), fornece uma estrutura capaz de aumentar as taxas de dados e a capacidade geral do sistema, reduzindo a latência e o consumo de energia e melhorando a eficiência espectral das conexões. Tal estrutura é formada principalmente por estações-base denominadas *Evolved Node B* (eNodeB) interconectadas entre si por meio de interfaces X2.

Uma eNodeB possui um número limitado de recursos de rádio, os *Physical Resource Blocks* (PRBs), que precisam ser compartilhados tanto para o *downlink* quanto para *uplink*. Por serem finitos, os PRBs precisam ser gerenciados de maneira otimizada para garantir a QoS das conexões atendidas e ao mesmo tempo proporcionar a melhor utilização dos recursos de rádio. O Gerenciamento de Recursos de Rádio (*Radio Resource Management* – RRM) é realizado através de algoritmos de escalonamento e admissão de conexões que não foram especificados pelo 3GPP.

Um desses algoritmos que visa otimizar os recursos de rádio e garantir a QoS das conexões é o algoritmo de Controle de Admissão de Chamadas (*Call Admission Control* - CAC). Uma eNodeB deve ser capaz de admitir ou rejeitar uma chamada de acordo

com critérios estabelecidos pelo algoritmo de CAC, geralmente associados aos requisitos de QoS da chamada, qualidade do canal e/ou disponibilidade de recursos de rádio.

Um dos desafios dos algoritmos de CAC atuais é desenvolver estratégias de gerenciamento de recursos que lidem com os dois tipos gerais de conexões: novas conexões e conexões em *handoff*. Os desempenhos alcançados por um algoritmo de CAC em torno desses dois tipos de conexões são geralmente mensurados a partir da probabilidade de bloqueio de conexões e probabilidade de perda de conexões [3].

1.1 Definição do Problema e Solução Proposta

Diferente do projeto de um algoritmo de CAC de uma rede cabeada, que precisa se preocupar apenas com os requisitos de QoS das conexões e a disponibilidade de recursos, os desafios encontrados no projeto para uma rede LTE são muito mais complexos.

A estimativa dos recursos necessários para garantir a QoS de um dado tipo de conexão é feita no momento em que esta solicita admissão na rede LTE e, com base nela, o CAC toma a decisão de admiti-la ou rejeitá-la. No entanto, durante o intervalo de duração da chamada, a conexão pode ser impactada por problemas característicos do canal sem fio, tais como ruído e interferências entre sinais, eventualmente exigindo a oferta de mais recursos.

Em redes sem fio, há o compromisso de garantir aos usuários mobilidade completa. A tecnologia LTE se compromete a suportar velocidades de até 350 km/h [4].

Um usuário ativo pode se mover de uma célula para outra. Para que haja continuidade de serviço durante a mudança, deve-se realizar o *handoff*, ou seja, a nova célula precisa ser capaz de suportar a chamada em andamento daquele usuário. Um *handoff* é efetuado com sucesso, quando a nova célula tem recursos disponíveis e suficientes para admitir a chamada em andamento. Caso não haja recursos suficientes, o *handoff* não é realizado e a chamada é descontinuada. A tendência dos sistemas de comunicação LTE é reduzir o tamanho das células, a fim de atender um número maior de usuários sem prejudicar a

mobilidade [2]. Como efeito, isso resulta em um aumento de ocorrências de *handoff* entre as células.

Como já dito, o 3GPP não especificou qualquer estratégia de gerenciamento de recursos, seja escalonamento ou controle de admissão. Assim sendo, fica a cargo dos fabricantes e pesquisadores desenvolver e implementar seus próprios métodos de controle de admissão de chamadas. De acordo com os critérios escolhidos para o algoritmo de CAC, nem todos os tipos de conexões e aplicações podem ser contemplados, sobretudo aplicações em tempo real e chamadas em *handoff*. Logo, o grande desafio do desenvolvedor de um algoritmo de CAC é escolher os critérios mais adequados para o gerenciamento de recursos e priorizar os tipos de chamada mais relevantes, com o intuito de obter a melhor utilização dos recursos de rádio da rede, garantir a QoS das conexões admitidas e proporcionar uma boa qualidade de experiência ao assinante [5].

Essa dissertação apresenta uma proposta de algoritmo de CAC que visa atender de forma eficaz conexões em tempo real, atendendo aos seus requisitos de QoS, e que prioriza chamadas em *handoff*. Também faz parte da proposta utilizar de maneira eficiente os recursos de rádio da eNodeB, obtendo o maior número de admissões possíveis. Tal proposta se baseia na divisão dos recursos de rádio em seções de largura de banda reservadas a certos tipos de conexão: conexões com requisitos de tempo mais restritivos (*real time*), conexões com requisitos de tempo mais flexíveis (*non-real time*) e chamadas em *handoff*. Essas seções têm a capacidade de reduzir/expandir sua largura de acordo com a demanda da célula, a partir da transferência de recursos de uma seção para outra. A proposta ainda considera a preempção de conexões *non-real time*, que é a extração de recursos antes reservados, já que esse tipo de conexão possui requisitos de QoS bastante flexíveis e pode operar de forma satisfatória mesmo com menos recursos.

1.2 Objetivos da Proposta

O objetivo geral desta dissertação é propor um algoritmo de CAC que utilize de forma eficiente os recursos de rádio ofertados, obtendo um desempenho ótimo em relação ao número de admissões totais sem prejudicar os requisitos de QoS das conexões admitidas. O algoritmo de CAC proposto também prioriza chamadas em *handoff*, que

são conexões que já estão em andamento e cuja perda gera uma percepção mais negativa por parte do usuário, prejudicando a sua qualidade de experiência.

A fim de alcançar este objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Divisão dos recursos de rádio da eNodeB em seções baseadas no tipo de conexão (conexão GBR ou non-GBR) e condição da conexão (se é uma nova conexão ou conexão em *handoff*);
- Definição da extensão de tais seções de recursos, baseadas na demanda das conexões dentro de um cenário realista contemporâneo, de forma que uma dada seção consiga atender o maior número de conexões associadas a ela;
- Implementação de funcionalidades que permitam a transferência de recursos de rádio de uma seção para outra sob certas condições, a fim de melhor aproveitamento dos recursos do sistema;
- Implementação de métricas apropriadas para o correto cálculo dos recursos necessários à garantia de QoS de uma conexão que solicita admissão, baseadas nas condições dos canais e dados de referência informados pelo UE;
- Implementação de rotinas para recálculo constante dos recursos de rádio reservados às conexões já admitidas para garantias de QoS, visto que a demanda de tais recursos pode mudar após a admissão;
- Desenvolvimento de funcionalidades de preempção, que sejam capazes de detectar conexões non-GBR passíveis de ter parte dos seus recursos disponibilizados para o atendimento de novas solicitações de admissão.

Dessa forma, espera-se que o algoritmo de CAC proposto seja uma alternativa significativa como método de tomada de decisão e contribua de maneira geral para uma melhor utilização dos recursos de rádio da eNodeB.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada a partir de capítulos, descritos a seguir:

O Capítulo 2 introduz os princípios e conceitos básicos da tecnologia LTE, padronizados pelo 3GPP. As arquiteturas da Rede de Acesso e Interface Aérea são apresentadas em detalhes. Além disso, são expostos os principais elementos geradores de interferências e erros nos sinais de rádio seguidos pelos meios com os quais o LTE minimiza tais problemas.

O Capítulo 3 aborda o controle de admissão de chamadas em detalhes, descrevendo as características gerais, seus objetivos e os critérios envolvidos no desenvolvimento de um algoritmo de CAC. São descritas também as classificações dos algoritmos CAC, baseados no tipo de abordagem. Na sequência, é apresentado o conceito de preempção de conexões e listadas as principais vantagens que justificam o uso de um algoritmo de CAC.

O Capítulo 4 apresenta a descrição minuciosa do algoritmo de CAC proposto neste trabalho, seus objetivos e os mecanismos desenvolvidos com o propósito de alcançá-los.

O Capítulo 5 descreve os métodos realizados para avaliação da proposta por meio de modelagem e simulação computacional, definindo o cenário e os parâmetros gerais. Ele também apresenta outros algoritmos de CAC conhecidos na literatura que foram usados como referência para a análise dos resultados, bem como as variáveis usadas na avaliação de desempenho. Finalmente, são apresentados os resultados dos algoritmos de CAC com as considerações relacionadas a cada um deles.

E por fim, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões gerais, considerações e os trabalhos futuros relativos ao tema abordado.

Capítulo 2

Visão Geral das Redes LTE

2.1 Introdução às Redes de Acesso sem Fio 4G

A tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) é um conjunto de especificações de alto nível criadas com o objetivo de aperfeiçoar o nível de serviço das inúmeras aplicações de rede. Ela é um padrão de redes de comunicações móveis idealizado pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) em sua *Release 8*, com alguns aprimoramentos na *Release 9* e *Release 10* [6] [7] .

O padrão LTE é uma evolução direta das tecnologias GSM (2G) e UMTS (3G), sendo popularmente conhecido como tecnologia 4G e mantendo compatibilidade com suas predecessoras.

Ele provê taxas de pico de até 325 Mbps no *downlink*, 80 Mbps no *uplink*, com latência inferior a 5 ms na RAN – *Radio Access Network*, oferecendo ainda, garantia de QoS às aplicações atendidas [7].

O LTE opera com larguras de banda de 1.4 MHz a 20 MHz e é compatível com todas as frequências de banda usadas pelo IMT-2000. As células da E-UTRAN possuem capacidade de dados e voz até 4 vezes maiores que as células HSPA, o que resulta em custos operacionais mais baixos.

Em termos de mobilidade, o LTE provê alto desempenho em UEs se movimentando a até 120 km/h e provê suporte funcional a UEs em velocidade máxima de 350 a 500 km/h, dependendo da largura de banda utilizada [8].

O LTE suporta multiplexações tanto no modo TDD (*Time Division Duplex*) quanto no modo FDD (*Frequency Division Duplex*), incluindo o modo *half-duplex* FDD. Uma célula LTE trabalha com FDD ou TDD. Um UE suporta todos os modos, embora possa utilizar somente um por vez.

A interface a rádio do LTE é totalmente de comutação de pacotes. Para manter a compatibilidade com tecnologias 2G e 3G (que utilizam redes de comutação de circuitos para voz), as operadoras devem recorrer a outras abordagens, entre elas o CSFB [9], o VoLGA [10] e o VoLTE [11].

Neste capítulo são apresentadas as principais características da tecnologia LTE, partindo da necessidade do desenvolvimento e implementação da tecnologia (Seção 2.2) até a descrição minuciosa de sua arquitetura de alto nível (Seção 2.3) e interface aérea (Seção 2.4), analisando seus requisitos, principais protocolos e as funcionalidades suportadas em cada camada.

A Seção 2.5 aborda os requisitos de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) associados às diferentes aplicações. Por fim, a Seção 2.6 apresenta as considerações finais deste capítulo.

2.2 A Necessidade do LTE

Inicialmente, o foco das redes móveis celulares era a transmissão, apenas, de chamadas de voz. No entanto, por conta da alta disponibilidade de redes 3G e 3.5G, da tarifação fixa das operadoras e de equipamentos mais atrativos com suporte a diversas aplicações, houve um grande crescimento da demanda por transmissão de dados. Este crescimento foi tão grandioso que, a partir de 2010, a transmissão de dados superou a transmissão de voz [12].

Como consequência, as tecnologias 2G e 3G passaram a sofrer com muitos congestionamentos a partir desse período, exigindo um aumento na capacidade das redes.

No entanto, como os domínios de comutação de pacotes das redes 3G operavam com atrasos superiores a 100 ms devido à alta complexidade, eles se tornavam inadequados para aplicações em tempo real (como voz e jogos *online*).

Nesse cenário, era clara a necessidade de novas abordagens para utilização eficiente do espectro, aumento da eficiência espectral e SINR, simplificação da interface a rádio e

redução na latência dos pacotes. O conjunto das técnicas utilizadas para alcançar esses objetivos deram origem à tecnologia LTE.

2.3 Arquitetura de Alto Nível do LTE

O objetivo primário do LTE foi proporcionar uma tecnologia que envolvesse somente a comutação de pacotes de dados. A primeira etapa do trabalho do 3GPP foi definir um conjunto de metas de desempenho e capacidade para o LTE [13].

Junto a esse estudo, também houve o desenvolvimento da arquitetura de rede geral do 3GPP, denominado SAE (*System Architecture Evolution*), que também incluía requerimentos para a evolução da arquitetura [14].

Nesse sentido, a arquitetura de rede de LTE foi separada em duas partes: a E-UTRAN (*Evolved UMTS Radio Access Network*) e uma nova arquitetura de rede de núcleo, denominada EPC (*Evolved Packet Core*). Juntas, RAN e EPC formam a EPS – *Evolved Packet System* [15].

Ao longo da seção, são descritos os principais componentes da rede de acesso a rádio e da rede de núcleo, bem como as interfaces e os protocolos de comunicação que os interligam.

2.3.1 Arquitetura da Rede de Acesso a Rádio – E-UTRAN

A E-UTRAN é responsável por todas as funcionalidades de rádio como por exemplo, gerenciamento de recursos de rádio, escalonamento, controle de admissão de chamadas, codificações, esquemas de multi-antena entre outros. Tais responsabilidades são atribuídas a um único nó, conhecido como eNodeB (eNB) [16].

A eNodeB também é responsável por promover transferência de dados usando as funções de processamento digital de sinais da interface aérea e controlar as operações de rede das camadas inferiores através de mensagens de sinalização. Ela se conecta a alguns elementos da rede de núcleo (EPC) através da interface S1: a interface S1-U (*S1 user plane part*) interliga a eNodeB a um *serving gateway* (S-GW) e a interface S1-C (*S1 control plane part*) a interliga com um *Mobility Management Entity* (MME). Por se

ligar a um MME, a interface S1-C também é denotada por S1-MME. Uma eNodeB pode estar ligada a mais de um S-GW/ MME.

A função da interface X2 é interligar diretamente uma eNodeB com outra. Ela é usada para dar suporte a mobilidade sem perdas entre células vizinhas através do repasse de pacotes, assim como o gerenciamento de recursos entre múltiplas células (*multi-cell RRM*). No entanto, ela é opcional: as eNodeBs podem se comunicar indiretamente através da própria EPC.

A Figura 2.1 apresenta as interconexões entre eNodeBs e elementos do EPC, de forma a proporcionar a conexão com múltiplos usuários.

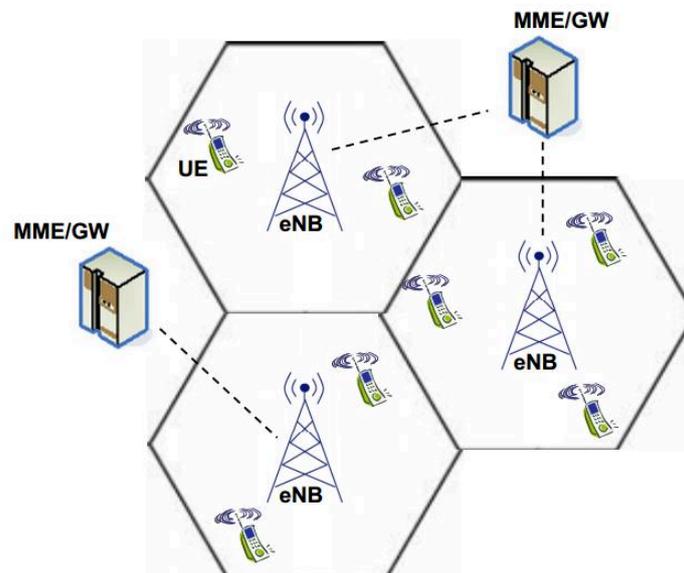


Figura 2.1: Interconexões entre eNodeBs e EPC (extraído de [59])

As interfaces S1 e X2 não são necessariamente conexões físicas. Elas podem representar uma rede de transporte interno que as emula de maneira lógica (baseada em endereçamento IP).

2.3.2 *User Equipment* (UE)

User Equipment é qualquer dispositivo usado diretamente por um usuário final para se comunicar através de uma rede sem fio. Ele pode ser um telefone celular, um *smartphone*, um *notebook* com um adaptador de rede móvel ou qualquer outro

dispositivo [17]. Do ponto de vista funcional, o UE é uma plataforma para aplicações de comunicação móvel, que troca sinais com uma rede para criar, configurar, manter e remover os links de comunicação que o usuário final necessita. Mais do que isso, o UE provê uma interface com o usuário final de forma que aplicações tais como o VoIP sejam usadas para configurar uma chamada de voz [18].

Embora o UE não seja um componente pertencente à SAE, é a partir dele que o usuário se comunica com uma dada PDN (*Packet Data Network*), como a Internet. Pelo fato do 3GPP não ter estabelecido uma nova arquitetura para o UE, sua arquitetura interna permanece idêntica ao UE usado nas tecnologias GSM e UMTS.

UEs são classificados em algumas categorias que definem informações mais relevantes para o estabelecimento da conexão. Outras informações, como as frequências em que ele pode transmitir/receber, são passadas no momento do registro. A Tabela 2.1 lista as categorias dos UEs e as informações associadas a cada uma delas. UEs mais antigos geralmente se encontram na Categoria 3 [4].

Tabela 2.1: Tabela de Categorias dos UEs (adaptada de [19])

| | Categoria | | | | |
|---|------------------|----|-----|-----|-------|
| | Releases 8/9/10 | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Taxa de pico - downlink (Mbits/s) | 10 | 50 | 100 | 150 | 300 |
| Taxa de pico - uplink (Mbits/s) | 5 | 25 | 50 | 50 | 75 |
| Modulação máxima - downlink | 64QAM | | | | |
| Modulação máxima - uplink | 16QAM | | | | 64QAM |
| Número máximo de camadas para multiplexação espacial - downlink | 1 | 2 | | | 4 |

2.3.3 Arquitetura da Rede de Núcleo (*Core Network*)

O EPC suporta apenas comutação de pacotes, ou seja, a comutação de circuitos é inexistente. Isso significa uma evolução radical em relação à rede de núcleo das

tecnologias anteriores GSM/WCDMA/HSPA. Ele é formado por diversos tipos de nós, descritos a seguir e representados na Figura 2.2

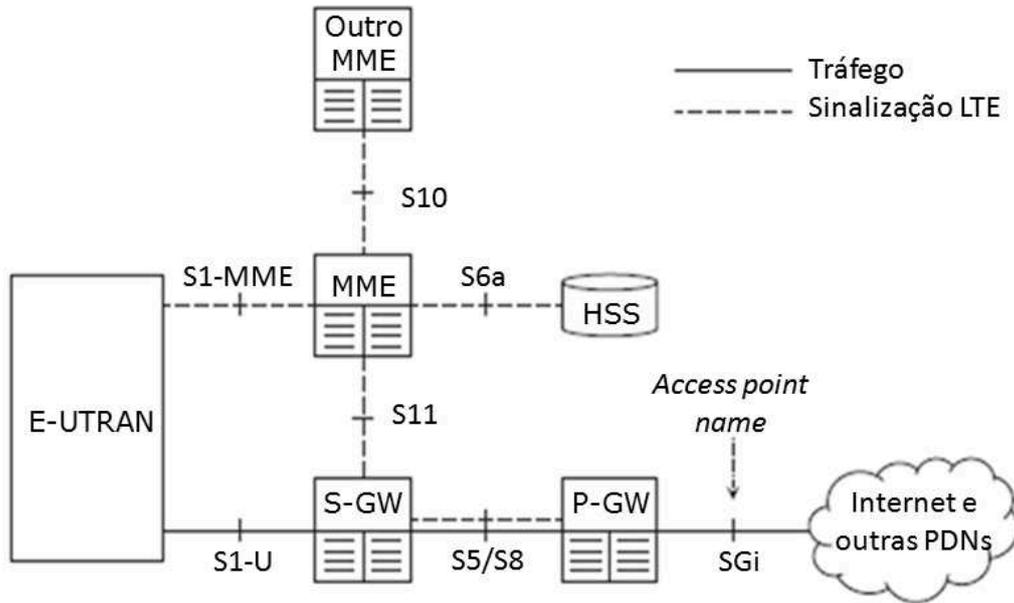


Figura 2.2: Arquitetura da rede de núcleo com seus principais nós (adaptada de [8])

2.3.3.1 P-GW – Packet Data Network Gateway

O P-GW é o ponto de contato da rede de núcleo com o mundo externo, ou seja, outras PDNs (*Packet Data Network*), tal como a Internet.

Através da interface SGi, ele é capaz de trocar dados com outros dispositivos externos à rede e PDNs. Cada uma das PDNs conectadas ao P-GW é identificada através de um APN (*Access Point Name*) [4].

Tanto a alocação de IP para um terminal quanto a definição da QoS são resolvidas no P-GW.

Cada UE é atribuído a um P-GW padrão a fim de garantir conectividade permanente a uma dada PDN, podendo posteriormente se conectar a outras PDNs através de novos P-GWs.

2.3.3.2 S-GW – *Serving Gateway*

O *Serving Gateway* é o nó da EPC que interliga a E-UTRAN ao P-GW. Ele se conecta à E-UTRAN através da interface S1-U e ao P-GW através da interface S5/S8.

- Interface S5: se os dispositivos pertencem à mesma rede
- Interface S8: se os dispositivos pertencem à redes distintas

A diferença entre essas interfaces são quesitos relacionados à segurança.

Caso duas eNodeBs precisem se comunicar, mas não possuam conexão direta através de uma interface X2, o S-GW pode atuar como elo de comunicação entre elas, possibilitando a troca de informações, como dados necessários para *handoff*, por exemplo.

2.3.3.3 MME – *Mobility Management Entity*

O MME é o nó da EPC responsável pelo controle de alto nível das operações do UE a partir da troca de mensagens de sinalização. Dentre essas operações, pode-se citar:

- conexão/liberação de *bearers* a um dado UE;
- transição entre os estados *ATIVO* e *IDLE* de um UE;
- manuseio de chaves de segurança;
- gerenciamento de mobilidade do UE;
- gerenciamento de *handoff* do UE;
- busca de dados do usuário para registro em rede.

2.3.3.4 HSS – *Home Subscriber Server*

O HSS é o nó responsável por armazenar dados de assinatura do usuário que serão usados para autenticação de um dado UE. É um dos poucos nós que praticamente não sofreu mudanças na implementação da SAE.

2.3.3.5 Outros Elementos do EPC

Além de sua estrutura básica, a EPC também é composta por outros elementos com funções específicas. Alguns elementos da EPC que merecem ser citados são:

- PCRF (*Policy Control and Charging Rules Function*): responsável pela definição de QoS de acordo com o perfil do usuário e cobrança de tarifas pelos serviços prestados.
- CBC (*Cell Broadcast Centre*): usado para *broadcast* em um serviço conhecido como ETWS (*Earthquake and Tsunami Warning System*).
- EIR (*Equipment Identity Register*): lista detalhes de UEs roubados ou perdidos.

2.4 Arquitetura da Interface Aérea

A troca de mensagens de dados e sinalização entre os elementos de rede apresentados na seção anterior acontece a partir de uma pilha de protocolos pré-estabelecida. Do ponto de vista funcional, a pilha de protocolos tem 2 planos. O plano de usuário (*User Plane*) gerencia informações de interesse do usuário, ou seja os dados que serão apresentados a ele. O plano de controle (*Control Plane*) lida com mensagens de sinalização entre os dispositivos, de modo a garantir a conexão e a transmissão de dados. Muitos protocolos acabam sendo comuns em ambos os planos [15].

A interface aérea possui 2 níveis: AS – *Access Stratum* e NAS – *Non-access Stratum*. Eles se referem à forma com que as demais interfaces se ligam à interface aérea. Se de maneira direta, a interface é dita de nível AS. Se não há conexão direta, a interface precisa usar o meio a partir de outras interfaces, juntamente com os respectivos protocolos delas, para se comunicar com a interface aérea. Nesse caso, a interface é dita de nível NAS [12].

A Figura 2.3 ilustra a arquitetura de protocolos da E-UTRAN. Embora o MME não faça parte da E-UTRAN, ele está presente na Figura 2.3 para maior entendimento da arquitetura de protocolos [8].

Na camada física (*layer 1*) se encontram as funções de processamento digital e analógico de sinais enviados e recebidos.

Como ilustrado na Figura 2.3, outros três protocolos compõem a camada seguinte (*layer 2*) tanto no plano de usuário quanto no plano de controle: PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), RLC (*Radio Link Control*) e MAC (*Medium Access Control*).

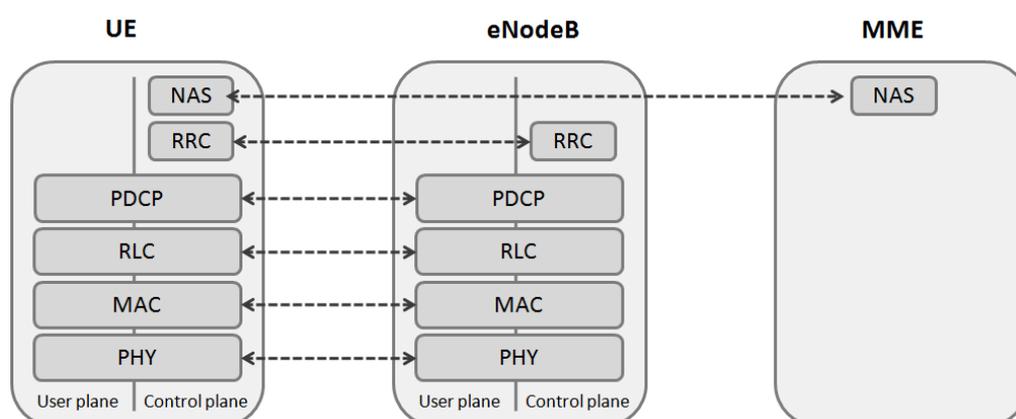


Figura 2.3: Arquitetura de Protocolos da E-UTRAN (adaptada de [4])

Os protocolos NAS e RRC completam a camada de protocolos no plano de controle. A seguir, seguem as descrições de cada um dos protocolos.

2.4.1 Protocolo PDCP - *Packet Data Convergence Protocol*

O PDCP é um protocolo com múltiplas funções, sendo as principais a compressão de cabeçalho, cifragem e proteção de integridade. Além disso, ele garante que nenhum pacote seja perdido durante o *handoff* para determinados fluxos de dados [12].

Os cabeçalhos podem ocupar um espaço considerável do pacote de dados. Isto pode até ser aceitável na EPC, mas é totalmente proibitivo na interface aérea, que funciona como um "gargalo" do sistema. Para tanto, o PDCP envia o cabeçalho completo apenas na transmissão do primeiro pacote: os demais seguem apenas com as diferenças entre as informações do cabeçalho original. Usando essa estratégia, um cabeçalho de 40 bytes pode ser reduzido para apenas 1 byte (3 bytes ao considerar IPv6). Como já dito, o LTE não dá suporte a transmissão de voz a partir de comutação de circuitos. Assim sendo, a compressão de cabeçalhos IP, UDP e RTP se mostra essencial para transmissão de voz a partir de uma rede de comutação de pacotes (VoIP) [8].

Durante o *handoff* de uma chamada, há uma breve interrupção entre o processo de transmissão e recepção, o que pode acarretar perdas de pacotes. Na transmissão de dados de certos fluxos, o PDCP armazena os pacotes em um *buffer* de retransmissão até que o protocolo RLC o informe que foram devidamente recebidos. Assim sendo, o PDCP tem a capacidade de retransmitir pacotes perdidos para a nova estação-base associada ao UE sempre que necessário [20].

Além dessas funcionalidades, o PDCP promove a criptografia dos pacotes no plano de usuário, revertendo o processo no receptor do pacote.

O PDCP também conta com um temporizador para prevenção de atrasos excessivos, podendo assim tomar decisões de descarte de pacotes ou retransmissão, de forma a atender os requisitos de QoS das aplicações.

No plano de controle, as mensagens de sinalização são protegidas por um processo extra conhecido como proteção de integridade. Para as mensagens de sinalização, não há *buffer* de retransmissão e nem compressão de cabeçalho IP.

2.4.2 Protocolo RLC –*Radio Link Control*

O Protocolo RLC é responsável pela entrega confiável de dados ao receptor. É ele também o protocolo responsável pela segmentação, reordenação e remontagem dos segmentos passados para as subcamadas MAC e PDCP.

A entrega confiável de dados é garantida através da operação ARQ – *Automatic Repeat Request*, por meio da aplicação do algoritmo CRC - *Cyclic Redundancy Check* [21].

As funções do RLC são realizadas em 3 modos distintos por entidades denominadas *RLC Entities*.

- *TM – Transparent Mode*: manipula mensagens de estabelecimento de conexão, *broadcast* e *paging* (no plano de controle). As mensagens são entregues à subcamada PDCP sem quaisquer modificações. Além disso, tais mensagens são pequenas o suficiente para dispensar segmentações, sendo este o modo mais simples de todos.

- UM – *Unacknowledged Mode*: assim como o TM, o UM é unidirecional e transporta pacotes de dados (plano do usuário). Sua prioridade é a eficiência ao invés de confiabilidade, assim sendo mais indicado para pacotes VoIP e vídeo (que são sensíveis a atrasos). Ele promove somente segmentação de dados e os segmentos podem chegar fora da ordem no receptor: o ARQ armazena os segmentos em um *buffer* especial e os reordena de acordo com os respectivos números de sequência.
- AM – *Acknowledged Mode*: modo bidirecional, que transporta tanto pacotes de dados (plano do usuário) quanto mensagens de sinalização (plano de controle). O modo AM é similar ao modo UM, mas é capaz de realizar retransmissão de pacotes perdidos sendo, portanto, adequado às aplicações sensíveis a perda de dados. O transmissor RLC envia os segmentos, mas também os armazena em um *buffer* de retransmissão até que seja informado de que a informação chegou ao receptor devidamente.

Em intervalos regulares, o transmissor envia um *polling bit* em um dos cabeçalhos: ele pede ao receptor que envie uma lista dos segmentos recebidos e faltantes através de um pacote de controle chamado *status PDU*. Assim que recebe a resposta, o transmissor descarta do *buffer* os segmentos entregues e retransmite aqueles que faltam.

2.4.3 Protocolo MAC – *Medium Access Control*

O Protocolo MAC é responsável pela multiplexação/demultiplexação de dados, retransmissões HARQ e escalonamento de pacotes no *downlink* e *uplink*. A comunicação com os protocolos RLC e a Camada física ocorre respectivamente através de canais lógicos e canais de transporte [8].

A entidade HARQ é responsável pela retransmissão de *Transport Blocks* (TBs), sempre que um erro de transmissão é identificado a partir de mensagens de sinalização ACK/NACK. Assim, o HARQ realiza a operação de *Stop-and-Wait*: uma vez que os dados são transmitidos, a entidade HARQ aguarda as mensagens de sinalização ACK/NACK para eventual retransmissão [18].

Um canal lógico é definido pelo tipo de informação que ele transporta e pode ser classificado como:

- Canal de Controle: transmissão de dados de controle e configuração necessários para a boa operabilidade do LTE;
- Canal de Tráfego: transmissão de dados do usuário.

Canais lógicos também podem ser classificados pela forma de alocação do canal:

- Canais lógicos dedicados: alocados para um determinado UE;
- Canais lógicos comuns: canais usados por qualquer UE.

2.4.3.1 Canais Lógicos

O conjunto de canais lógicos do LTE inclui:

- DTCH (*Dedicated Traffic Channel*): como o próprio nome indica, é um canal dedicado de *uplink/downlink* para transmissão de dados;
- DCCH (*Dedicated Control Channel*): canal dedicado de *uplink/downlink* para transmissão das principais mensagens de sinalização de UEs no estado ativo;
- CCCH (*Common Control Channel*): canal de *uplink/downlink* que conduz mensagens de sinalização para UEs que estão em estado *idle* (em *stand-by*) e querem passar para estado ativo (conectado);
- PCCH (*Paging Control Channel*): canal de *downlink* que conduz mensagens de *paging*, que a estação-base transmite quando quer contatar UEs no estado *idle*;
- BCCH (*Broadcast Control Channel*): canal de *downlink* que carrega mensagens RRC com informações sobre as configurações da célula. Há 2 tipos de mensagens (MIB e SIB) que são conduzidos para diferentes canais de transporte:
 - MIB (*Master Information block*): informações essenciais;
 - SIB (*System Information block*): restante de informações.
- MCCH (*Multicast Control Channel*): Canal de *downlink* que carrega mensagens de sinalização *multicast* em um serviço conhecido como MBMS (*multimedia broadcast/multicast service*). Apareceu pela primeira vez na *Release 9* do 3GPP;

- MTCH (*Multicast Traffic Channel*): Canal de *downlink* que carrega mensagens de dados *multicast* do MBMS.

2.4.3.2 Canais de Transporte

As principais diferenças entre os canais de transporte são suas abordagens em relação ao gerenciamento de erros.

Os canais de transporte UL-SCH e DL-SCH são os únicos que usam a técnica *Automatic Repeat Request* (ARQ) e sua versão híbrida HARQ e podem adaptar sua taxa de codificação de acordo com a relação sinal-ruído e interferência (SINR) do canal.

Os demais canais possuem taxa de codificação fixa e utilizam outro mecanismo para gerenciamento de erros (FEC - *Forward Error Correction*).

O conjunto de canais de transporte do LTE inclui:

- UL-SCH (*Uplink Shared Channel*): conduzem os dados e a maior parte das mensagens de sinalização através da interface aérea, do UE até a estação-base;
- DL-SCH (*Downlink Shared Channel*): conduzem os dados e a maior parte das mensagens de sinalização através da interface aérea, da estação-base até o UE. Também transportam as mensagens RRC com informações diversas do sistema (SIB);
- PCH (*Paging Channel*): conduzem as mensagens de *paging* provenientes do canal lógico PCCH (*downlink*);
- BCH (*Broadcast Channel*): conduzem as mensagens RRC com informações principais do sistema (MIB);
- MCH (*Multicast Channel*): conduzem os dados e mensagens de sinalização do serviço MBMS (*broadcast/multicast*), provenientes dos canais lógicos MCCH e MTCH;
- RACH (*Random Access Channel*): canal de transporte especial por onde um UE pode contatar imediatamente a estação-base sem necessidade de determinar tempos e sub-portadoras específicas para isso (*scheduling*).

Existe um elemento no protocolo MAC denominado Canal Lógico de Priorização, que atribui um valor de prioridade e uma *bit rate* para cada um dos canais lógicos. O MAC realiza a multiplexação dos dados, organizando os canais na ordem de prioridade e coletando os dados que serão transmitidos pelo mesmo canal de transporte. A operação reversa (demultiplexação) é feita na subcamada MAC do receptor.

O protocolo MAC também inclui um escalonador que organiza as transmissões no *downlink* e as transmissões dos UEs no *uplink*, a partir da geração dos comandos de escalonamento e concessões de escalonamento (*scheduling commands* e *scheduling grants*, respectivamente). Além disso, o protocolo MAC envia e recebe alguns elementos MAC de controle (*MAC control elements*) que controlam certas operações da camada física.

2.4.4 A Camada Física

A camada física é responsável pela codificação, modulação, acesso múltiplo, processamento de sinal para múltiplas antenas e mapeamento dos dados para os recursos em tempo-frequência apropriados.

2.4.4.1 Canais Físicos de Dados

O mapeamento dos fluxos de dados provenientes dos canais de transporte passam a ser transmitidos por canais conhecidos como canais físicos de dados. Cada canal de transporte possui seu canal físico de dados correspondente, exceto o canal PCH, cujas mensagens de *paging* são transmitidas pelo canal físico PDSCH.

O conjunto de canais físicos de dados do LTE inclui:

- PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*): conduzem os dados e as mensagens de sinalização do canal de transporte DL-SCH e também as mensagens de *paging* do canal PCH;
- PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*): conduzem os dados e as mensagens de sinalização do canal de transporte UL-SCH e em alguns casos mensagens UCI (*Uplink Control Information*);

- PRACH (*Physical Random Access Channel*): conduzem mensagens MAC do canal de transporte RACH;
- PBCH (*Physical Broadcast Channel*): conduzem as mensagens MIB (informações de sistema principais) do canal de transporte BCH;
- PMCH (*Physical Multicast Channel*): conduzem os dados e as mensagens de sinalização *multicast* do canal de transporte MCH. Passou a ser utilizado a partir da *Release 9*, quando os canais lógicos MCCH e MTCH foram especificados pela 3GPP.

2.4.4.2 Informações de Controle, Canais Físicos de Controle e Sinais da Camada Física

Além dos canais físicos de dados, existem canais na camada física que não estão relacionados à nenhum canal de transporte, sendo conhecidos como canais físicos de controle.

Tais canais são responsáveis pela geração de informações de controle que auxiliam as funções da camada física. As principais informações de controle transmitidas pelos canais físicos de controle são:

- DCI (*Downlink Control Information*): conjunto de informações especiais para a recepção apropriada e decodificação dos dados de *downlink*, como os *scheduling grants* e *scheduling commands*. São transmitidas pelo canal físico de controle PDCCCH (*Physical Downlink Control Channel*);
- UCI (*Uplink Control Information*): informações usadas para solicitar recursos (*scheduling requests*), descrever as condições dos subcanais (CQI – *Channel Quality Indicator*) e indicações de ACKs referentes aos pacotes recebidos. São transmitidas pelo canal físico de controle PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*);
- CFI (*Control Format Indicators*): indicadores relacionados à organização dos dados no *downlink*. São transmitidos pelo canal físico de controle PCFICH (*Physical Control Format Indicator Channel*);

- HI (*Hybrid ARQ Indicator*): ACKs das transmissões *uplink* através do UL-SCH. São transmitidos pelo canal físico de controle PHICH (*Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*).

Por fim, são gerados também sinais específicos que auxiliam certas operações da camada física, como sinais de referência e sinais de sincronização primária e secundária.

2.4.4.3 Princípios do OFDMA e SC-FDMA

Como dito anteriormente, uma das funções da camada física é providenciar o acesso múltiplo de vários UEs aos recursos da rede.

Acesso múltiplo é a generalização de uma técnica mais simples, a multiplexação. A diferença é que a Multiplexação trata de diversos fluxos de dados distintos para um mesmo dispositivo. Já no acesso múltiplo, tem-se vários fluxos de dados, cada um para um dispositivo distinto. Sistemas de comunicações móveis devem ser capazes de usar técnicas que realizem o acesso múltiplo de forma eficiente [22].

O 3GPP padronizou a técnica de transmissão *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) para o tráfego *downlink* e *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) para o *uplink*.

A ortogonalidade se refere ao uso eficiente do espectro: é possível que as subportadoras utilizadas para transmissão de dados se sobreponham, sem interferir nas subportadoras vizinhas.

O espaçamento entre as frequências do OFDM provê a ortogonalidade no sentido matemático, o que garante que na demodulação não ocorra interferência entre as subportadoras. Este espaçamento está relacionado à duração do símbolo, que no LTE é de 66,7 μ s. Isso gera um espaçamento de 15 kHz.

As subportadoras são divididas em grupos, que são alocados de acordo com a demanda dos usuários. Cada grupo possui 12 subportadoras com espaçamento de 15 kHz, formando o PRB (*Physical Resource Block*), como ilustrado na Figura 2.4.

Por conta de prefixos que separam símbolos consecutivos, a taxa de transmissão de símbolos é levemente menor que 15Ksps - aproximadamente 14 Ksps.

O prefixo cíclico CP (*Cyclic Prefix*) é adicionado entre sucessivos símbolos OFDM durante a transmissão como medida de prevenção para o problema de multipercurso (*multipath*). Um prefixo cíclico consiste basicamente de uma repetição da última parte do símbolo OFDM anterior e, por isso, é utilizado como um modo de sinalização e detecção pelo lado do receptor [4].

No OFDMA um UE pode ou não usar um conjunto contíguo de subportadoras.

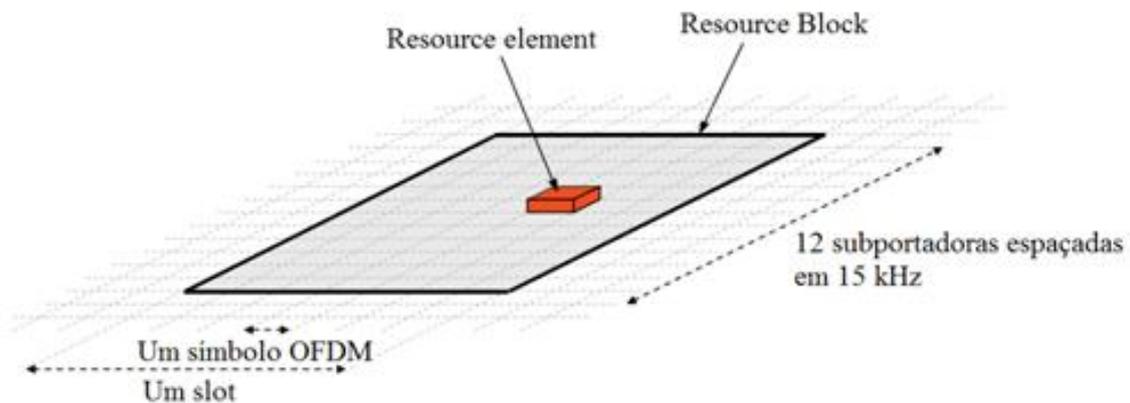


Figura 2.4: Esquemática de um *Physical Resource Block* (adaptada de [4])

Embora trabalhe muito bem no *downlink*, a técnica OFDMA possui uma grande desvantagem: a alta variação da potência do sinal transmitido. Com efeito, a técnica não é adequada para o *uplink*, já que os transmissores dos UEs são simples e baratos e não conseguem amplificar de forma linear sinais com alta variação. Dessa forma, adotou-se outra técnica para transmissões no *uplink*: o SC-FDMA.

O SC-FDMA também trabalha com subportadoras espaçadas ortogonalmente e com prefixos cíclicos separando os símbolos que transportam os dados.

A estratégia principal do SC-FDMA é combinar símbolos para serem mapeados nas subportadoras, dessa forma controlando a potência do sinal transmitido. Qualquer combinação de operações entre os sinais pode ser feita, desde que o receptor seja capaz

de revertê-la: basta encontrar a melhor combinação que minimize as variações de potência.

Contudo, o SC-FDMA exige que as transmissões utilizem um único bloco de subportadoras contíguas, já que assim há uma minimização extra na variação de potência do sinal. A partir da *Release* 10, uma maior flexibilidade foi alcançada, em que as transmissões podem ser realizadas em até 2 blocos de subportadoras contíguas.

O SC-FDMA não é adequado para o *downlink*, pois a estação-base precisa transmitir para vários UEs, não somente para um.

O escalonamento de recursos do *uplink* ainda é gerenciado pela estação-base (exceto o canal RACH). Assim sendo, ela é capaz de identificar o UE e suas respectivas transmissões, no domínio do tempo e da frequência.

2.4.4.4 Modos de Multiplexação TDD e FDD

O LTE tem suporte tanto para o modo TDD quanto para o modo FDD. Uma célula trabalha ou com o modo TDD ou FDD. Um UE suporta todos os modos, embora possa usar somente um modo por vez.

- Modo TDD (*Time Division Duplex*): tanto a estação-base quanto o UE transmitem e recebem dados na mesma portadora, porém em tempos distintos. É possível ajustar tempos diferentes para *downlink* e *uplink* e há necessidade de sincronismo com estações vizinhas, para que não haja interferências;
- Modo FDD (*Frequency Division Duplex*): estação-base e UEs transmitem e recebem em portadoras diferentes, em geral com a mesma largura de banda (adequado para transmissão de voz). Não há necessidade de sincronismo com estações vizinhas, o que faz com que este modo seja mais adequado para áreas urbanas. Os UEs precisam de filtros de altas atenuações para separar transmissor do receptor. Existe uma variante denominada *Half Duplex FDD*, em que o UE ora transmite, ora recebe, não sendo necessário o filtro.

2.5 Qualidade de Serviço em Redes LTE

A qualidade de serviço (QoS) se tornou parte importante no planejamento e design de redes LTE, já que a garantia de QoS é essencial para a disponibilidade de certas aplicações críticas, como voz e vídeo, cuja demanda é cada vez maior. O LTE foi projetado para atender essas demandas crescentes de dados e voz com conexões confiáveis e de baixo custo de implantação [23].

Novos mecanismos são criados para diferenciar serviços e prover a QoS necessária a cada um deles. Tais mecanismos incluem controles de admissão de chamadas, protocolos de reservas de recursos e políticas de escalonamento de pacotes [24] [25] [26].

A QoS é implementada entre o UE e o PDN *Gateway* e aplicada em um conjunto de *bearers* (portadoras).

Bearer é um conceito virtual de um conjunto de configurações de rede cujo propósito é fornecer um tratamento especial a um determinado tipo de conexão [27]. Em redes LTE, a estrutura de *bearers* é utilizada para prover o serviço fim-a-fim das aplicações de forma adequada, ou seja, atendendo aos requisitos de QoS das mesmas [28].

O EPC configura uma *EPS bearer*, denominada *default bearer*, sempre que o UE se conecta a uma dada PDN. Como a *EPS bearer* abrange 3 interfaces diferentes (canal de rádio, interface S1 e interface S5/S8), a *EPS bearer* é subdividida em 3 *bearers* denominadas *radio bearer*, *S1 bearer* e *S5/S8 bearer*. A combinação da *radio bearer* e *S1 bearer* é conhecida como *Evolved Radio Access Bearer* (E-RAB). A Figura 2.5 apresenta a estruturação das *bearers*, como foi descrita na referência [23].

Como se espera que múltiplas aplicações com diferentes requisitos de QoS possam ser executadas simultaneamente em um UE, o LTE organiza os fluxos de tráfego de forma paralela. Assim, além da *default bearer*, o LTE estabelece uma nova *EPS bearer* para cada aplicação cujo fluxo de dados apresente requisitos de QoS distintos. Tais *EPS bearers* são popularmente conhecidas como *dedicated bearers*.

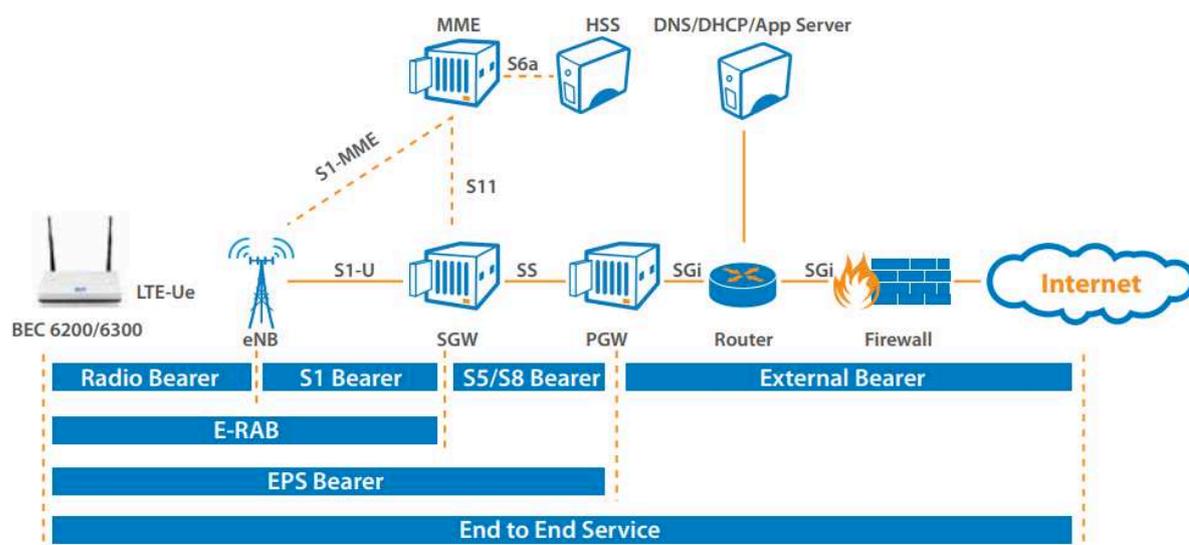


Figura 2.5: Modelo de *bearers* na Arquitetura LTE (extraído de [23])

Cada *bearer* é associada a alguns parâmetros de QoS, que são gerenciados segundo o conjunto de regras e procedimentos definidos pela *Policy and Charging Control* (PCC). A PCC é responsável pelos mecanismos de fiscalização e controle de carga que são aplicados a cada *bearer* criada entre o UE e a PDN [29].

As *bearers* podem ser classificadas em duas categorias [27]:

- *Guaranteed Bit Rate* (GBR): oferece garantia de largura de banda à aplicação e uma maior probabilidade de que perdas de pacote relacionadas ao congestionamento (causados por "transbordamento" de *buffers*) não irão ocorrer, através de funções de controle de admissão de conexões existentes nos elementos de rede LTE que são executadas quando uma *bearer* é estabelecida ou modificada.
- *Non-Guaranteed Bit Rate* (*non-GBR*): não oferece garantia de largura de banda e pode apresentar perdas de pacotes por congestionamento, porém possui a vantagem de se manter estabelecida por longos períodos sem que venha a ser bloqueado nenhum recurso de transmissão na rede LTE.

Dedicated bearers são geralmente usadas para aplicações GBR, embora também possam ser *non-GBR*. *Default bearers* sempre são *non-GBR*.

O conceito de QoS sobre as *bearers* é baseado em classes. Cada *bearer* é configurada com um identificador de classe de QoS denominado de *QoS Class Identifier* (QCI). O QCI é um valor usado pelos elementos da rede LTE para identificar a tratativa que deve ser dada aos fluxos de tráfego associados a uma dada *bearer*.

O QCI determina 4 parâmetros:

1. Tipo de recurso: se uma *bearer* é GBR ou *non-GBR*;
2. Atraso máximo de pacotes: indica o tempo máximo de tolerância de atraso que um pacote pode ter entre o UE e o PDN *gateway*;
3. Taxa de perda de pacotes: indica a proporção de pacotes que podem ser perdidos por conta de erros na transmissão e recepção;
4. Nível de prioridade: determina a ordem em que os pacotes são processados.

A Tabela 2.2, reproduzida de [30], lista os valores de QCI juntamente com os valores de seus parâmetros.

Tabela 2.2: Características Padronizadas dos Valores de QCI (adaptada de [28])

| QCI | Tipo de Recurso | Prioridade | Atraso Máximo de Pacotes (ms) | Taxa de perda de pacotes | Exemplos de Serviço |
|-----|-----------------|------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| 1 | GBR | 2 | 100 | 10^{-2} | Voz conversacional |
| 2 | | 4 | 150 | 10^{-3} | Video conversacional (<i>live streaming</i>) |
| 3 | | 3 | 50 | 10^{-3} | <i>Games</i> em tempo real |
| 4 | | 5 | 300 | 10^{-6} | Video não-conversacional (<i>buffered streaming</i>) |
| 5 | non-GBR | 1 | 100 | 10^{-6} | Sinalização IMS |
| 6 | | 6 | 300 | 10^{-6} | Video baseado em TCP (<i>buffered streaming</i>) |
| 7 | | 7 | 100 | 10^{-3} | Voz, video (<i>live streaming</i>) e games interativos |
| 8 | | 8 | 300 | 10^{-6} | Video baseado em TCP (<i>buffered streaming</i>) |
| 9 | | 9 | 300 | 10^{-6} | Video baseado em TCP (<i>buffered streaming</i>) |

Além do QCI, cada *bearer* também é associada a um identificador ARP (*Allocation Retention Priority*). Entre outras funções, o ARP é utilizado para determinar a ordem na

qual uma rede congestionada deveria satisfazer os requisitos de QoS das conexões já admitidas e gerenciadas pela rede LTE. Além disso, o ARP também define se uma *bearer* pode captar recursos vinculados a outras *bearers* através da preempção ou se pode perder recursos através do mesmo processo [8].

2.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou as características gerais da tecnologia LTE. Primeiramente, foi apresentado o conceito de tecnologia de quarta geração, bem como seus objetivos principais, características operacionais, utilização de banda entre outros.

Em seguida, foi discutida a real necessidade de tal tecnologia, tendo em vista a geração 2G e 3G.

Foram apresentados os componentes de alto nível do padrão LTE, incluindo a interface aérea (E-UTRAN), representada pela estação-base, a rede de núcleo, o equipamento de usuário e as interfaces que conectam cada um deles.

Também foi descrito detalhadamente a organização da interface aérea no LTE, seus protocolos principais e respectivas atribuições e os diversos canais lógicos, de transporte e físicos que transportam os dados e sinais de controle de um nó a outro.

Na sequência, na Camada Física foram apresentadas as novas abordagens de Acesso Múltiplo e seus aprimoramentos e também modos de multiplexação suportados pelo LTE.

Por fim, o capítulo analisou a importância das garantias de QoS para o bom funcionamento das diversas aplicações, impactando positivamente na qualidade de experiência do usuário final. O conceito de *bearer* é apresentado, bem como a forma com que a tecnologia LTE as utiliza no intuito de estabelecer a provisão de QoS, seja para uma conexão ou várias conexões em paralelo. Por fim, são apresentadas as classes de QoS e o identificador de classe QCI, que determina a abordagem utilizada para um dado fluxo de tráfego em uma *bearer*.

Capítulo 3

Controle de Admissão de Chamadas em Sistemas LTE

3.1 Introdução

Como já discutido anteriormente, a tecnologia LTE visa atender a crescente demanda de dados ocasionada pelo aumento do número de usuários e a complexidade de aplicações de rede que, cada vez mais, exigem uma QoS significativa. O LTE é uma proposta de atendimento a essas necessidades, fornecendo altas taxas de dados de maneira flexível a partir da melhoria da eficiência espectral. O *Radio Resource Management* (RRM), em português, Gerenciamento de Recursos de Rádio, tem uma função fundamental para atender esses objetivos. O *design* dos algoritmos RRM tem impacto direto sobre a QoS garantida a cada uma das conexões individuais e sobre a eficiência geral do sistema.

Dentre as funções do RRM, o CAC é um dos mais significativos. A escolha de um algoritmo de CAC apropriado pode garantir que as conexões devidamente admitidas por ele sejam atendidas com os recursos de rádio necessários para a garantia de QoS, conferindo aos usuários uma excelente qualidade de experiência e reforçando a ideia de eficiência do LTE [5].

Enquanto o CAC toma a decisão de admitir novos usuários, o escalonador de pacotes deve garantir a QoS dos diferentes fluxos de dados já admitidos a partir da alocação dinâmica dos recursos. Espera-se que o trabalho em conjunto desses dois algoritmos seja capaz de reduzir a taxa de perdas de conexões.

Este capítulo descreve o funcionamento geral do CAC, as principais classificações, os critérios utilizados para a tomada de decisão, a preempção de conexões, as vantagens da

utilização do CAC e alguns mecanismos de CAC encontrados na literatura como proposta para a admissão de conexões.

3.2 Noções Gerais sobre CAC

Uma RAN tem o papel de fornecer serviços de rede como transferência de arquivos, streaming de áudio/vídeo, jogos e voz sobre IP (VoIP) com garantia de QoS. Espera-se que uma RAN deva suportar o maior número de usuários a fim de maximizar as receitas operacionais [31].

Devido à mobilidade dos usuários e ao número limitado de recursos de rede, se todas as conexões fossem admitidas, certamente os requisitos de QoS associados a cada uma delas não pudessem ser garantidos, à medida que a taxa de ocupação da rede crescesse [32].

O CAC é responsável por analisar se a estação-base tem condições de aceitar uma dada conexão de acordo com a taxa de ocupação da rede, dos requisitos de QoS da conexão, condição da conexão e condições dos canais. Ao limitar o número de conexões admitidas em uma dada célula LTE, o CAC visa garantir que a QoS de cada uma delas seja mantida [33].

O principal objetivo do CAC é garantir a alocação eficiente dos recursos de rede e monitorar a utilização de tais recursos em cenários de alto volume de conexões.

Em cenários típicos, o CAC calcula os requisitos de largura de banda na forma de PRBs (*Physical Resource Blocks*) e verifica se o sistema possui recursos disponíveis para admitir uma conexão. Mesmo que uma conexão seja admitida, a qualidade dos canais de rádio em relação a um determinado UE pode mudar, uma vez que o usuário pode, por exemplo, se locomover ou o UE pode mudar a potência de seu sinal de transmissão. Assim, considera-se que os recursos necessários para manter um determinado serviço com a qualidade esperada (ou seja, a QoS da conexão) varia com o tempo. O CAC deve, portanto, calcular os recursos necessários para uma conexão tanto no instante em que é solicitada a sua admissão, quanto durante todo o seu intervalo de duração, a fim de determinar com precisão os recursos disponíveis do sistema [34].

Assim, espera-se que o algoritmo de CAC de uma rede 4G deva ser capaz de gerenciar os recursos do sistema em tempo real, inclusive realizando recálculos dos recursos necessários para as chamadas.

De uma maneira geral, o CAC lida com dois tipos de conexões: novas chamadas (*new calls* – NC) e chamadas em *handoff* (*handoff calls* – HC), estas últimas sendo conexões que já estão em andamento sendo transferidas de uma célula para outra. O desempenho do algoritmo de CAC geralmente é avaliado pela taxa de bloqueio de novas conexões e taxa de perdas de conexões (relacionadas às conexões em *handoff*) [35], [36], [37], [38].

O bloqueio de conexões diz respeito à rejeição de uma nova conexão por insuficiência de recursos de rádio ou requisitos de QoS. A perda de conexões diz respeito à interrupção de uma chamada em andamento devido a um processo de mobilidade do usuário (em *handoff*), seja veicular ou pedestre [39].

Do ponto de vista do usuário, é mais frustrante a queda de uma conexão em andamento do que o bloqueio de uma nova conexão, de forma que, via de regra, algoritmos de CAC que distinguem tipos de conexões acabam priorizando as conexões em andamento sobre as novas conexões, mantendo a taxa de perdas de conexões próxima do zero [36].

Ao contrário de outras redes móveis celulares baseadas em comutação de circuitos para dados de voz, as redes 4G são exclusivamente de comutação de pacotes. Assim sendo, ao idealizar um modelo de CAC para o sistema LTE, é necessário que parâmetros de desempenho desse tipo de rede, tais como probabilidade de perda de pacotes e atraso de transmissão, também sejam considerados pelo algoritmo proposto. [34].

Segundo [40], a natureza variável de parâmetros normalmente considerados no processo de admissão de chamadas como a localização geográfica, velocidade e direção do usuário, potência de transmissão disponível, condições de canal entre outros pode interferir nas estimativas do algoritmo de CAC, eventualmente levando a tomadas de decisão erradas. Assim, espera-se que os algoritmos de CAC das redes móveis levem estes fatores em consideração e sejam capazes de atribuir a quantidade de recursos adequada a cada uma das classes de serviço em seus cálculos de admissão, a fim de

evitar tanto perdas de conexões quanto admissões equivocadas, especialmente durante períodos de alta demanda por serviços [41].

De acordo com a tomada de decisão, o CAC pode admitir ou rejeitar uma conexão. Em seus cálculos de admissão, o CAC pode considerar um número menor de recursos de rádio necessários para a garantia de QoS de certas chamadas já admitidas, a fim de liberar mais recursos para novas admissões [5].

Os padrões LTE não estabelecem nenhuma abordagem ou técnica de controle de admissão, ficando a cargo dos fabricantes de equipamentos LTE e pesquisadores definirem regras e critérios para as tomadas de decisão [27].

3.3 Modelo Geral de um Algoritmo de CAC

De acordo com [1], um algoritmo de CAC geralmente possui três componentes principais: Gerenciamento de Informações, Reserva de Recursos e Controle de Admissão. Ao trocar informações entre si, esses 3 componentes têm por objetivo a minimização de degradação da QoS e a maximização do uso dos recursos da rede.

3.3.1 Gerenciamento de Informações

Componente responsável pelo registro do estado da rede. A quantidade de informações gerenciadas por este componente depende do tipo do algoritmo de CAC usado. Tais informações são trocadas entre as células ou usadas localmente. Os demais componentes têm acesso a todas essas informações.

3.3.2 Reserva de Recursos

Como o próprio nome indica, este componente é responsável pela reserva de recursos. A partir da leitura das informações do gerenciamento de informações, este componente é capaz de realizar o cálculo da quantidade de recursos a serem reservados para uma

dada conexão que solicita admissão. São utilizadas técnicas de otimização e estimação a fim de maximizar a utilização dos recursos da rede.

3.3.3 Controle de Admissão

Componente responsável pela tomada de decisão sobre a admissão ou rejeição de uma conexão. A tomada de decisão leva em consideração tanto as informações do Gerenciamento quanto os cálculos realizados pela reserva de recursos. Além de poder admitir ou rejeitar uma chamada, alguns algoritmos de CAC consideram manter a chamada em uma fila durante um certo tempo, até que recursos se tornem disponíveis.

A Figura 3.1 apresenta a estrutura dos 3 componentes principais de um CAC.



Figura 3.1: Principais componentes de um algoritmo de CAC (adaptada de [1])

3.4 Projeto de um Esquema de CAC

O projeto de um esquema de CAC geralmente leva em consideração alguns dos seguintes parâmetros:

- **Disponibilidade de Recursos:** uma vez que os recursos de rede são finitos, as novas chamadas e chamadas em *handoff* são admitidas com base na existência de recursos disponíveis;
- **Priorização de Conexões:** as conexões são classificadas em chamadas em tempo real (*RT calls*) e chamadas sem demanda de tempo real (*non-real time*)

calls). Chamadas em tempo real têm prioridade sobre as outras conexões por conta de sua sensibilidade a atraso e requisitos de QoS. Chamadas de emergência e chamadas em *handoff* têm os maiores níveis de prioridade sobre outras conexões. As outras chamadas também são classificadas por nível de prioridade, mas são categorizadas abaixo das já citadas. Reservas de recursos e filas são utilizadas para implementar prioridade às conexões;

- **Qualidade dos parâmetros da rede:** a qualidade da conexão tem o papel principal no estabelecimento de uma transmissão com uma boa relação sinal-ruído. O indicador RSS (*Received signal strength*) é usado para avaliar a qualidade do *link* entre os componentes de rede do sistema. Parâmetros de qualidade da rede, encontrados em todos os elementos, podem ser considerados pelo processo de tomada de decisão do CAC [1];
- **Gerenciamento de mobilidade:** com o intuito de reduzir a probabilidade de perda de chamadas, o fator mobilidade precisa ser considerado pelo CAC a fim de prever o movimento dos UEs ao redor da estação-base. A previsão de mobilidade do usuário pode contribuir para a classificação da conexão, resultando em uma alocação de recursos mais eficiente;
- **Parâmetros gerais de sistema:** o CAC pode usar parâmetros gerais do sistema como base para suas tomadas de decisão tais como utilização da banda, atrasos de pacotes, tipos de conexões já admitidas, taxas de transferência da rede entre outros;
- **Outros métodos de otimização:** para melhorar o desempenho do processo de admissão de chamadas, uma ampla variedade de técnicas de otimização podem ser usadas. O CAC pode ser projetado de forma a se adaptar dinamicamente a um determinado cenário, reconfigurando suas variáveis internas, tais como limiares, taxas de perda de chamadas, taxas de bloqueio de chamadas, preempção e seções de reserva de recursos de acordo com o estado da rede [42]. Espera-se que tais métodos de otimização sejam capazes de reduzir a complexidade do processo de admissão enquanto os torna mais acurados [1].

A referência [5] traz inúmeros estudos de caso de algoritmos de CAC que usam as mais variadas estratégias para gerenciar os recursos de rede.

3.5 Classificação dos Controles de Admissão

Existem várias abordagens para classificar os diferentes modelos de CAC. Em [43], Luka et al. trazem algumas das abordagens mais populares, apresentadas na Figura 3.2. Na seção 3.6 é apresentado outro esquema de classificação, baseado nos critérios usados pelo controle de admissão.



Figura 3.2: Classificação de algoritmos de CAC (Adaptada de [43])

3.5.1 Abordagem Centralizada ou Distribuída

Um algoritmo de CAC centralizado é executado de uma base e as informações referentes às células que fazem parte de uma dada rede LTE precisam, assim, serem enviadas para essa base central a fim de poderem ser analisadas pelo CAC.

Já o algoritmo CAC distribuído é executado localmente, na estação-base de cada uma das células. Este tipo de CAC ainda pode ser classificado como colaborativo (as informações do gerenciamento são trocadas entre as células vizinhas, permitindo tomadas de decisão mais acuradas, tendo por base a disponibilidade de toda a rede) ou local (as informações do Gerenciamento são usadas localmente para tomada de decisão). Embora algoritmos de CAC colaborativos sejam mais acurados, eles exigem uma troca de dados excedente entre as células.

O algoritmo de CAC proposto utiliza a abordagem distribuída local.

3.5.2 Abordagem baseada em Padrão de Tráfego e baseada em Medições

Um algoritmo de CAC classificado como baseado em tráfego leva em consideração o padrão de tráfego relacionado a um tipo de conexão (considerando que ele pode ser determinado). Assim, a tomada de decisão do algoritmo de CAC considera a quantidade esperada de recursos a serem reservados para a conexão como efeito comparativo aos recursos disponíveis. Se a soma dos valores de intensidade de tráfego das conexões já admitidas e da conexão que solicita admissão for menor que um dado limiar (ou menor que o total de recursos de rede) a conexão é admitida. Um algoritmo de CAC baseado em padrão de tráfego geralmente é conservador visto que, na prática, as conexões não usam a quantidade máxima de recursos determinados.

Um algoritmo de CAC baseado em medições leva em consideração o estado atual da rede para sua tomada de decisão. Assim sendo, em tempos regulares (ou assim que uma conexão solicita admissão, por exemplo) são realizados cálculos e medições que definem a quantidade real de recursos que estão sendo utilizados pelas conexões em andamento. A estimação da quantidade de recursos a serem reservados para uma conexão é feita tomando por base critérios como as condições dos canais e tipo de conexão.

A abordagem utilizada pelo algoritmo de CAC proposto é aquela baseada em medições para sua tomada de decisão.

3.5.3 Abordagem baseada na Granularidade do Controle de Recursos

Esta classificação leva em conta três critérios diferentes para categorizar um algoritmo CAC, conforme descrito a seguir.

O primeiro critério é o tipo de informação utilizada para a tomada de decisão do CAC. Geralmente, utiliza-se o número de PRBs por unidade de tempo, mas alguns algoritmos

podem levar em consideração a largura de banda total ou padrões de mobilidade dos usuários.

O segundo critério é a distribuição espacial dos UEs (posição e movimento). Tal distribuição pode ser uniforme ou não-uniforme e essa distinção impacta no uso de recursos da rede.

O terceiro critério está relacionado em como a informação é organizada e interpretada pelo algoritmo de CAC. Ele pode considerar os recursos reservados de todas as chamadas já admitidas para tomada de decisão ou os recursos individuais de cada conexão ou tipo de conexão. A quantidade de recursos usados pode ainda ser discriminada pelo tipo de chamada ou condição dos canais, por exemplo.

Tomando por base esses 3 critérios, um algoritmo CAC apresenta uma granularidade diferenciada dos demais. Um algoritmo que lida com a reserva agregada de recursos para todas as conexões com distribuição uniforme tem a granularidade máxima. Já um CAC que considera a reserva de recursos por conexão e uma distribuição espacial não-uniforme apresenta a granularidade mínima.

O algoritmo de CAC proposto considera como base para sua tomada de decisão o número de recursos de rede (PRBs) disponíveis e necessários para a admissão de cada uma das conexões.

3.6 Principais Critérios para Admissão de Conexões

Um critério muito usado em mecanismos de CAC é classificar as conexões em chamadas de tempo real (*Real Time – RT calls*), para chamadas de voz e *streaming* e chamadas sem demanda de tempo real (*Non-real Time – NRTcalls*) para os demais serviços. Em geral, pela natureza do serviço, conexões RT têm prioridade sobre conexões NRT. Em alguns casos, ocorre a preempção de recursos de algumas conexões NRT para atender conexões RT em cenários críticos.

Outro critério comumente usado é a condição do canal entre o usuário e a estação-base. Canais com estimação de qualidade considerados ruins exigem mais recursos de rede nos cálculos do algoritmo de CAC, contribuindo para a redução no número de conexões efetivamente admitidas. O algoritmo de CAC pode usar um limiar como referência (por exemplo, a taxa de ocupação da rede) para tomar a decisão de aceitar ou não uma conexão sob essas condições. Em [44], o autor propôs um algoritmo de CAC que considera um limiar de qualidade de canal estimada baseado no RSS para classificar as conexões que solicitam admissão. Os critérios para admissão de conexões com estimação de qualidade de canal abaixo desse limiar são mais rigorosos, dependendo da taxa de ocupação da rede entre outras variáveis.

Ainda, outro critério não menos importante, que é geralmente levado em consideração pelos algoritmos de CAC mais recentes, é a natureza da conexão: se é uma nova conexão ou uma conexão em *handoff* (sendo transferida de uma célula para outra), com esta última tendo prioridade. A perda de uma conexão em *handoff* (*calldrop*) é crítica, pois impacta na qualidade de experiência do usuário, uma vez que ele teve sua chamada em andamento interrompida [36]. Assim, conexões em *handoff* deveriam ter prioridade sobre novas chamadas. Partindo desse critério, é possível classificar os algoritmos de CAC como:

- **Esquemas não-priorizadores (*non-prioritized schemes*):** como o próprio nome indica, são algoritmos de CAC que não fazem nenhuma distinção entre novas chamadas e chamadas em *handoff*. Independente do seu tipo, se é uma nova chamada ou uma chamada em *handoff*, a análise de disponibilidade de recursos ocorre da mesma forma. Em um CAC básico, caso não haja recursos de rede suficientes (PRBs) para admissão da conexão, ela é sumariamente descartada. Em [25], os autores propuseram um algoritmo de CAC usando Controle de Potência Fracionária (FPC - *Fractional Power Control*), estabelecida pelo 3GPP [45]. A conexão é admitida somente se a soma do número de PRBs requeridos e dos PRBs já reservados for menor que um determinado limiar. Assim, o algoritmo leva em consideração apenas os requisitos de QoS, desconsiderando completamente o tipo de chamada. Já em [46], é proposto um algoritmo chamado de GCAD-CAC (*Greedy Choice with Bandwidth Availability – CAC*). O algoritmo tenta aceitar todos os tipos de conexões, diferenciadas em 3 classes de tráfego. Conexões de uma classe com

prioridade forçam a preempção de conexões de baixa prioridade. Com efeito, recursos são liberados para conexões que requisitaram admissão. Mais uma vez, não é feita distinção de nova chamada e chamada em *handoff*. Em [32], conexões RT recebem prioridade máxima quando o tempo de espera de seus pacotes no buffer se aproxima do atraso máximo (*delay deadline*), independente se é uma nova chamada ou chamada em *handoff*. Em [47], é proposto um algoritmo que analisa apenas novas chamadas: uma conexão é rejeitada se o número de conexões já admitidas é maior que um limiar pré-definido.

- **Esquemas prioritizadores (*prioritized schemes*):** são algoritmos de CAC que diferenciam novas conexões de conexões em *handoff* (*handoff calls* - HC), priorizando estas últimas. Isso significa que a probabilidade de perdas de conexões HC é menor do que em esquemas não-priorizadores. Geralmente, a priorização se dá através de seções com recursos reservados (*guard channel*) ou filas de *handoff*. Em [36], um novo método é proposto para minimizar a probabilidade de perda de conexões em *handoff*. Tal método se baseia em um algoritmo de CAC adaptativo que admite toda chamada em *handoff* e ainda provê recursos suficientes para garantia de QoS a partir de funções de escalonamento. No entanto, a QoS é garantida somente para chamadas em *handoff*, com pouco compromisso com a QoS de novas chamadas. Em [48], os autores apresentaram um esquema de CAC que prioriza conexões em *handoff*, mas que também se preocupa com as condições das conexões non-GBR, no intuito de minimizar as probabilidades de perda e bloqueio desse tipo de conexão e aumentar a eficiência no uso dos recursos de rede. Em [49], os autores propuseram um GC-CAC (*Guard Channel CAC*). A ideia básica do algoritmo é garantir que, em seus cálculos, parte dos recursos de rede sejam usados para atender apenas chamadas de emergência e chamadas em *handoff*. O algoritmo reserva determinados canais para uso prioritário dessas conexões. Novas chamadas são rejeitadas se o número de recursos disponíveis estiverem abaixo de um determinado limiar. Algoritmos GC-CAC diferem no número de canais reservados. Eles também podem ser fixos (número de canais é estático) [50] ou dinâmicos (número de canais varia de acordo com alguma condição do sistema) [51].

A partir dos critérios mencionados, inúmeros mecanismos de controle de admissão podem ser implementados. Seguem alguns dos mecanismos de controle de admissão de conexões propostos na literatura:

- **CAC Básico:** o algoritmo de CAC mais simples possível simplesmente verifica se há recursos de rede disponíveis para uma dada conexão e compara com o valor estimado de recursos necessários para garantia de QoS da conexão, sem se preocupar com quaisquer características da mesma. Havendo recursos disponíveis (PRBs), ele realiza a admissão. Caso contrário, ele a rejeita.
- **CAC Baseado no Tipo de Conexão:** no esquema proposto em [52], as conexões são inicialmente classificadas em RT ou NRT. Conexões RT podem ser chamadas em *handoff* (HC) ou novas chamadas (NC). Os PRBs são divididos em 3 categorias: chamadas NRT, chamadas RT e chamadas RT em *handoff* (HC). O algoritmo de CAC verifica a disponibilidade de recursos para uma conexão, de acordo com a sua classificação. Assim, uma conexão NRT só é aceita se houver recursos na parte referente à chamadas NRT. Da mesma forma, chamadas RT em *handoff* são admitidas caso haja recursos em sua respectiva parte. Caso não haja recursos suficientes para admissão de uma nova chamada RT, é realizada preempção nas conexões NRT já admitidas. Com efeito, novas chamadas RT recebem prioridade sobre chamadas em *handoff*. Por não considerar as condições do canal, este algoritmo não pode garantir alta taxa de transferência de dados.
- **CAC Baseado nas Condições do Canal:** os autores em [53] propuseram um CAC que considera os recursos da rede separados em 2 partes: *Real Time* (RT) para chamadas de voz e vídeo e *Non-real time* (non-RT) para conexões do tipo *Best Effort*. Conexões NRT são aceitas se houverem recursos disponíveis na respectiva parte. Os PRBs destinados às conexões RT são subdivididos em 3 partes: chamadas de voz com boas condições de canal, conexões de vídeo com boas condições de canal e conexões com más condições de canal (*bad channel*). Conexões RT com más condições de canal somente são aceitas se tiverem recursos disponíveis na respectiva subparte. Chamadas em *handoff* recebem prioridade sobre novas chamadas. As condições do canal são medidas a partir das mensagens de sinalização (RSS) trocadas entre eNodeB e o UE. Caso não hajam PRBs suficientes para as conexões RT com boas condições de canal, recursos da parte de *bad channel* podem ser usadas. Assim, conexões com más condições de canal acabam tendo menos prioridade do que chamadas NRT.

3.7 Preempção de Conexões

A preempção de conexões é um mecanismo que permite que o escalonador desassocie recursos de rede previamente utilizados por conexões classificadas como de baixa prioridade, a fim de que tais recursos possam ser usados para atender os requisitos de QoS das conexões de maior prioridade em andamento (sensíveis a atrasos, por exemplo) ou possam ser usados por novas conexões. Dessa forma, tem-se um maior aproveitamento dos recursos de rádio do sistema, possibilitando o atendimento de um número maior de usuários.

A disponibilidade para preempção é gerenciada pelo ARP (*Allocation & Retention Priority*), um atributo de *bearer* muito utilizado pelo CAC, com 3 campos: [8]

- Nível de prioridade (*priority level*): tem como função determinar as conexões que, em cenários de congestionamento, receberão prioridade, ou seja, conexões para as quais o sistema fará o possível para manter a QoS;
- Capacidade de preempção (*pre-emption capability*): determina se a *bearer* pode se apropriar de recursos de outra *bearer* de prioridade mais baixa;
- Vulnerabilidade de preempção (*pre-emption vulnerability*): determina se a *bearer* pode perder recursos em cenários de congestionamento.

Um algoritmo de CAC pode considerar o mecanismo de preempção em suas estratégias de gerenciamento de recursos, liberando recursos previamente reservados a algumas chamadas admitidas em seus cálculos, a fim de que tais recursos liberados possam permiti-lo admitir novas conexões.

É importante lembrar que o CAC gerencia os recursos da rede a nível de tomada de decisão, não determinando, a princípio, qualquer garantia desses recursos. Como descrito, tanto a entrega de recursos quanto a execução da preempção é realizada pelo escalonador de pacotes.

3.8 Vantagens do Uso de Controle de Admissão de Conexões

O uso do CAC como agente de controle do número de conexões admitidas em uma dada célula LTE se justifica pela necessidade de entrega de QoS aceitável ao usuário. Uma vez que os recursos de rede são finitos, é impraticável que a célula consiga atender toda a demanda de conexões. Ao mesmo tempo, o número de admissões deve ser adequado para gerar a receita esperada pela operadora do serviço. Assim, o algoritmo de CAC pode também ser usado para a priorização de serviços e classes de usuário, sendo uma alternativa para o compartilhamento justo dos recursos entre eles.

3.8.1 Garantia de QoS

É a principal razão de existir do algoritmo de CAC: limitar o número de conexões a fim de garantir que os recursos do sistema sejam capazes de suprir os requisitos de QoS de cada uma delas. Dessa forma, ele maximiza a utilização dos recursos do sistema. Em redes sem fio, esta questão se torna mais complexa por conta da mobilidade do usuário, que implica em eventuais *handoffs* e variações na qualidade do canal.

Em consideração à qualidade de experiência do usuário, conexões em *handoff* são prioritárias. Geralmente, o algoritmo de CAC faz uso da disponibilidade de recursos para tomada de decisão, porém ela pode ser feita com base em uma probabilidade de falha de *handoff*.

Em redes sem fio, o algoritmo de CAC também pode ser usado para limitar o nível de tráfego na rede, no intuito de evitar sobrecarga e conseqüentemente atraso dos pacotes. Isso pode ser implementado fazendo com que os parâmetros de QoS dos pacotes sejam usados como critério de admissão das conexões.

3.8.2 Receita da Operadora

A admissão de uma chamada implica na utilização de recursos da rede, o que gera receita para a operadora. No entanto, se a rede admitisse toda a demanda de conexões, isso causaria, frequentemente, sobrecarga na rede com potenciais perdas de conexões.

Sendo assim, a utilização de esquemas CAC pode aumentar a receita da operadora no sentido de evitar sobrecargas e perdas. Neste caso, o número de usuários conectados ou a probabilidade de deterioração de QoS podem ser usados como critérios de admissão.

3.8.3 Priorização de Serviços e Classes de Usuários

Um dado algoritmo de CAC pode utilizar como critérios de admissão o tipo de serviço e classe de usuário. Com efeito, ele tem condições de priorizar certas classes de serviço ou tipo de serviço, como conexões VoIP ou chamadas de emergência sobre as demais. Além disso, os critérios de admissão podem favorecer usuários que pagam por serviços diferenciados à operadora. A priorização de conexões e classes de usuários permite à operadora um controle mais acurado sobre a rede, além da oferta de planos diferenciados aos seus clientes.

3.8.4 Compartilhamento Justo de Recursos

O algoritmo de CAC tem condições de admitir ou rejeitar chamadas baseado nos recursos alocados para conexões de mesmo serviço ou classe de usuário. Com efeito, ele é capaz de proporcionar a entrega justa de recursos para usuários de uma mesma classe ou classes diferentes. Para o compartilhamento justo de recursos, o CAC pode ainda considerar características individuais de usuários, como mobilidade e condições do canal [54].

3.9 Considerações Finais

Cenários futuros de redes móveis celulares serão caracterizados pela coexistência de uma variedade de tecnologias heterogêneas de acesso sem fio. Haverão pilhas de protocolos complexas, suportando uma série de aplicativos e serviços com diferentes demandas de Qualidade de Serviço (QoS) e, além disso, exigindo novas estratégias de acesso a essas redes. O Controle de Admissão de Chamadas (CAC) é uma técnica de Gerenciamento de Recursos de Rádio, que visa fornecer Qualidade de Serviço (QoS)

justa para usuários em redes móveis celulares. Essas técnicas permitem que a operadora possa gerenciar seus recursos de rede, fornecendo um melhor serviço aos seus usuários [55].

Foram descritas as principais características de um algoritmo de CAC e o seu principal propósito, que é selecionar e admitir conexões, de forma a otimizar a utilização dos recursos finitos da estação-base [5].

Primeiramente, foram descritas as características globais dos algoritmos de CAC, a partir de noções gerais e um modelo geral de algoritmo de CAC. Posteriormente, foram listados os parâmetros que orientam a escolha da melhor estratégia de tomada de decisão durante o projeto do algoritmo de CAC, tais como disponibilidade de recursos, priorização de conexões, qualidade da rede, gerenciamento de mobilidade entre outros métodos de otimização.

Na sequência foi apresentada a classificação mais comum de algoritmos de CAC, levando em consideração o tipo de abordagem: centralizada ou distribuída; baseada em padrão de tráfego ou em medições ou baseada na granularidade do controle de recursos. Foram citados e analisados os principais critérios considerados na admissão de conexões, definindo assim os esquemas priorizadores e não-priorizadores. Foi apresentado o conceito de preempção de conexões, na qual o algoritmo de CAC libera recursos estimados que antes estavam reservados, a fim de possibilitar a admissão de mais conexões.

O capítulo é finalizado com a apresentação das principais vantagens relacionadas ao uso do controle de admissão de chamadas e traz alguns exemplos de mecanismos populares de admissão de chamadas encontrados na literatura. Os conceitos apresentados são de fundamental importância para a proposta de trabalho e desenvolvimento descritos no próximo capítulo.

Capítulo 4

Uma Proposta de Algoritmo de CAC com Reserva Dinâmica e Preempção para Redes LTE

4.1 Introdução

Como já dito anteriormente, as redes LTE operam com comutação de pacotes. Assim sendo, ao alocar recursos às conexões dos usuários, deve-se considerar os requisitos de QoS de cada uma delas, a fim de atendê-las de forma eficaz e proporcionar uma boa qualidade de experiência ao usuário. Por outro lado, os recursos de uma célula LTE são limitados, o que torna impraticável a admissão de todas as conexões. Dessa forma, torna-se necessário um mecanismo de controle de admissão de conexões que gerencie continuamente os recursos de rede e, a partir dos critérios estabelecidos para este gerenciamento, tome a decisão de admitir ou não uma conexão.

Este capítulo tem por objetivo apresentar a proposta de um algoritmo de CAC para redes LTE, que prioriza as conexões GBR e conexões em *handoff* através da adaptação dinâmica de seções reservadas de recursos de rede e preempção de conexões non-GBR, que são mais tolerantes à redução de sua taxa de dados, visando atender os requisitos de QoS das conexões e melhorando de maneira geral a eficiência da rede.

A estrutura do capítulo está organizada da seguinte forma: na Seção 4.2 é descrito o problema e as razões que motivaram a pesquisa. A Seção 4.3 apresenta a solução, que é o algoritmo de CAC proposto neste trabalho. A Seção 4.4 descreve em detalhes a estrutura e o funcionamento do algoritmo de CAC proposto. Por fim, a Seção 4.5 traz as considerações finais do capítulo.

4.2 Descrição do Problema

Como já dito, os padrões LTE não apresentam especificações para o mecanismo de CAC, assim como para o escalonamento de recursos. Isso possibilita a elaboração de novas estratégias por parte da comunidade científica, assim como permite aos fabricantes de equipamentos de redes diferenciarem seus produtos e torná-los mais competitivos comercialmente [56]. Essa é uma das principais motivações para a elaboração da proposta apresentada nesta dissertação.

Além disso, os trabalhos na literatura que exploram o Gerenciamento de Recursos de Rádio geralmente dão mais ênfase a estratégias de escalonamento de recursos, muitas vezes sem mencionar a maneira com a qual a rede escolhe as conexões a serem admitidas. Nesses casos, a carga de tráfego imposta na rede e a quantidade de conexões estão oportunamente limitadas à capacidade de transmissão do enlace, o que de certa forma dispensa ou torna implícita a adoção de um mecanismo de CAC. Sendo assim, existe uma relativa carência de trabalhos que exploram algoritmos de CAC.

Como também já foi dito, a tendência dos sistemas de comunicação LTE é reduzir o tamanho das células, o que ocasionará um aumento de ocorrências de chamadas em *handoff*. Nem todos os mecanismos de CAC apresentados na literatura priorizam esse tipo de conexão.

4.3 Solução Proposta

Por conta da relativa escassez de estratégias de controle de admissão de conexões, sobretudo aquelas que priorizam as chamadas em *handoff*, neste trabalho propõe-se um algoritmo de CAC que visa suprir essa necessidade.

O algoritmo de CAC proposto se baseia nos requisitos de QoS das principais classes de serviço presentes em especificações do 3GPP, levando em consideração o tipo de conexão (nova conexão ou chamada em *handoff*) em cenários de redes tipicamente urbanos.

As estimativas de recursos por parte do algoritmo de CAC são realizadas em tempo real e sempre que uma conexão solicita admissão na célula LTE, a fim de que as tomadas de decisão sejam precisas e os recursos sejam distribuídos da maneira mais eficiente possível.

4.4 Proposta do Algoritmo de CAC

O algoritmo de CAC proposto funciona da seguinte maneira. Os recursos de rádio da eNodeB (PRBs) são subdivididos em 3 seções distintas: a seção para chamadas em *handoff*, a seção para conexões GBR e a seção para conexões non-GBR. A seção GBR possui recursos para conexões classificadas como *Real-Time services*, mais sensíveis a atrasos, como VoIP, áudio/vídeo e *gaming*. A seção non-GBR possui recursos destinados a conexões do tipo *Non-real Time services*, mais tolerantes a atrasos, como conexões Web e FTP. Novas conexões GBR e non-GBR só são admitidas se houverem recursos suficientes nas seções GBR e non-GBR, respectivamente. Chamadas em *handoff* são admitidas somente se houverem recursos suficientes na seção de *handoff*, independente se são conexões GBR ou non-GBR.

A distribuição inicial dos recursos da rede LTE entre as 3 seções é de 20% para a seção de *handoff*, 40% para a seção GBR e 40% para a seção non-GBR, conforme a Figura 4.1. Esses valores foram determinados a partir da realização de várias simulações envolvendo diferentes cenários. Dentre todas as distribuições de recursos de rede testadas, a distribuição apresentada foi a que obteve o maior aproveitamento dos recursos.

O algoritmo é ativado sempre que uma conexão solicita admissão na célula LTE. Dependendo do seu tipo, a conexão é colocada em uma fila.



Figura 4.1: Distribuição Inicial dos Recursos da rede LTE (do próprio autor)

As conexões GBR em admissão ainda são classificadas em chamadas VoIP e conexões de Vídeo, com as chamadas VoIP tendo preferência sobre todas as demais.

A cada TTI, uma função específica do algoritmo verifica as conexões já admitidas e recalcula os recursos necessários estimados para manter a QoS que a rede LTE se propõe a garantir. Este recálculo é necessário porque ao longo do tempo a conexão já admitida pode ser impactada por inúmeros fatores, como, por exemplo, a mobilidade do usuário ou variações da condição do canal. Nesses casos, uma conexão já admitida poderia necessitar de uma quantidade de recursos diferente da quantidade calculada no momento de sua admissão para garantia de QoS. Os valores recalculados das conexões já admitidas são reservados em suas respectivas seções.

Sendo $RNec(n)$ a estimativa dos recursos necessários para garantia de QoS da n ésima conexão já admitida pertencente à seção s , o cálculo de Recursos Reservados $RRes(s)$ da seção s é feito conforme a Equação 4.1 abaixo:

$$RRes(s) = \sum_{1}^{n} RNec(i) \quad [PRBs] \quad (4.1)$$

Assim sendo, os recursos disponíveis ($RDisp(s)$) da seção s são definidos pela diferença entre o total de recursos da seção ($RTot(s)$) e os recursos reservados às suas conexões já admitidas ($RRes(s)$), conforme a Equação 4.2:

$$RDisp(s) = RTot(s) - RRes(s) \quad [PRBs] \quad (4.2)$$

O cálculo da estimativa dos PRBs necessários para garantia de QoS de uma dada conexão já admitida é o mesmo cálculo realizado para o critério de admissão de uma conexão, que será apresentado na sequência.

A função de admissão é ativada de acordo com o tipo de conexão. Na função de admissão são estimados os recursos que a conexão necessitará, levando em consideração os seus requisitos de QoS (especificados pelo 3GPP) e de acordo com os dados de referência informados pelo UE que a originou, principalmente o *Channel Quality Indicator (CQI)*.

Os recursos estimados para garantia de QoS da conexão a ser admitida são então comparados com os recursos disponíveis em sua respectiva seção. Caso a seção tenha recursos suficientes (PRBs), a conexão é admitida. Caso contrário, ela é rejeitada.

Quando uma conexão é admitida, os recursos disponíveis de sua respectiva seção são atualizados. A taxa de ocupação $TxOcup(s)$ da seção s é recalculada conforme a Equação (4.3):

$$TxOcup(s) = \frac{RRes(s)}{RTot(s)} \quad (4.3)$$

4.4.1 Determinação da Eficiência Espectral da conexão

Como dito anteriormente, uma conexão é admitida se houver recursos disponíveis para sua admissão, de acordo com o que foi estimado pelo algoritmo de CAC para suprir seus requisitos de QoS. O principal critério para determinação da quantidade de tais recursos é a eficiência espectral do canal. A eficiência espectral corresponde ao número de bits que se consegue transmitir por cada hertz de largura de banda por segundo [25]. Um canal eficiente é aquele que consegue enviar mais dados (bits) sob uma dada largura de banda (Hz) durante 1 segundo (s). A unidade de medida da Eficiência Espectral é o bps/Hz.

Nos sistemas LTE, a Eficiência Espectral é definida tomando por base o CQI de cada um dos PRBs da banda. A medição do CQI é usada para estimar o índice MCS (*Modulation and Coding Scheme*) mais adequado, conforme a Tabela 4.1, extraída da referência [57].

Por sua vez, o índice MCS determina o índice TBS (*Transport Block Size*), utilizado para determinar o valor apropriado de bits a serem alocados no PRB. A Tabela 4.2. relaciona o valor do MCS com o índice TBS.

Uma vez definido o índice TBS, pode-se consultar o tamanho em bits do *Transport Block* de um dado PRB através de valores tabelados e padronizados pelo 3GPP. A Tabela TBS pode ser encontrada em [57].

Tabela 4.1: Tabela de CQI e Índice MCS (extraída de [57])

| CQI | Modulação | Índice MCS |
|-----|-----------|------------|
| 0 | - | - |
| 1 | QPSK | 0 |
| 2 | QPSK | 2 |
| 3 | QPSK | 4 |
| 4 | QPSK | 6 |
| 5 | QPSK | 8 |
| 6 | QPSK | 10 |
| 7 | 16QAM | 12 |
| 8 | 16QAM | 14 |
| 9 | 16QAM | 16 |
| 10 | 64QAM | 18 |
| 11 | 64QAM | 20 |
| 12 | 64QAM | 22 |
| 13 | 64QAM | 24 |
| 14 | 64QAM | 26 |
| 15 | 64QAM | 28 |

Por fim, com o valor do *Transport Block* definido a partir do CQI, é possível calcular o valor da Eficiência Espectral do *i*-ésimo PRB, a partir da equação (4.4) [36]:

$$Eff_{spc}(i) = \frac{(TB_i/t)}{f_{sub}} \text{ [bps/Hz]} \quad (4.4)$$

onde:

TB_i - número de bits apropriado para o *i*-ésimo PRB

t - tempo considerado para a transmissão do número de bits do *Transport Block* (1 ms)

f_{sub} - largura de banda do *i*-ésimo PRB, ou seja 180 kHz

Tabela 4.2: Tabela de índices MCS e TBS (extraída de [57])

| Índice MCS | Ordem de Modulação | Índice TBS |
|------------|--------------------|------------|
| 0 | 2 | 0 |
| 1 | 2 | 1 |
| 2 | 2 | 2 |
| 3 | 2 | 3 |
| 4 | 2 | 4 |
| 5 | 2 | 5 |
| 6 | 2 | 6 |
| 7 | 2 | 7 |
| 8 | 2 | 8 |
| 9 | 2 | 9 |
| 10 | 4 | 9 |
| 11 | 4 | 10 |
| 12 | 4 | 11 |
| 13 | 4 | 12 |
| 14 | 4 | 13 |
| 15 | 4 | 14 |
| 16 | 4 | 15 |
| 17 | 6 | 15 |
| 18 | 6 | 16 |
| 19 | 6 | 17 |
| 20 | 6 | 18 |
| 21 | 6 | 19 |
| 22 | 6 | 20 |
| 23 | 6 | 21 |
| 24 | 6 | 22 |
| 25 | 6 | 23 |
| 26 | 6 | 24 |
| 27 | 6 | 25 |
| 28 | 6 | 26 |
| 29 | 2 | reservado |
| 30 | 4 | |
| 31 | 6 | |

A Equação 4.4 é aplicada a cada um dos PRBs da eNodeB. Posteriormente, é feita a média aritmética das eficiências espectrais calculadas, denominada μ .

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Eff_{Spc}(i) \quad (4.5)$$

onde:

N- número total de PRBs

$Eff_{Spc}(i)$ - Eficiência espectral do i-ésimo PRB

Em seguida, é calculado o desvio padrão σ a partir das amostras de Eficiência Espectral obtidas anteriormente (Equação 4.6), que posteriormente é somado ao valor da Eficiência espectral média calculada na Equação 4.5.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Eff_{Spc}(i) - \mu)^2} \quad (4.6)$$

onde:

N- número total de PRBs

$Eff_{Spc}(i)$ - Eficiência Espectral do i-ésimo PRB

μ - Eficiência Espectral Média calculada na Equação 4.5

Um fator de correção η é usado para ajustar o resultado obtido da Eficiência Espectral com a taxa de chegada de usuários, de acordo com [58] e utilizado em [25]. Para as taxas de chegada usadas nas simulações do CAC proposto e de acordo com o ambiente de simulação considerado, o valor de η é de 0,68, em conformidade com os trabalhos citados.

Sendo assim, o cálculo de Eficiência Espectral usada como referência para determinar os recursos necessários para admissão de uma conexão é:

$$Eff_{Spc} = \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Eff_{Spc}(i) \right) + \sigma \right] * \eta \quad (4.7)$$

onde:

N - número total de PRBs

Eff_{Spc}(i) - Eficiência Espectral do iésimo PRB

σ - Desvio Padrão dos valores de Eficiência Espectral calculados na Equação 4.6

η – fator de correção para a Eficiência Espectral, determinada de acordo com a taxa de chegada de usuários na rede e ambiente de simulação considerado.

4.4.2 Estimativa de Recursos

De acordo com [25], com o valor da Eficiência Espectral e conhecendo o valor da taxa de bits requerida pela conexão (S) necessária para atender os requisitos de QoS do tipo da conexão que solicita admissão, é possível estimar o número de PRBs necessários para efetiva garantia de QoS (n_{PRB}) a partir da seguinte equação:

$$n_{PRB} = \frac{S}{(f_{sub} * Eff_{Spc})} * 1000 \quad (4.8)$$

onde:

S – taxa de bits requerida pela conexão (GBR da conexão)

f_{sub} - largura de banda de 1 PRB, ou seja, 180 kHz

Eff_{Spc} - Eficiência Espectral calculada na Equação 4.7

Conexões non-GBR, como o próprio nome diz, não possuem uma GBR especificada. Para que a equação possa ser utilizada para este tipo de conexão, considera-se um valor inicial de 512 kbps para estimação dos PRBs [36]. Durante a preempção de conexões, esse valor passa a ser considerado 96 kbps, o que proporciona disponibilização de recursos para novas admissões.

O resultado encontrado é arredondado para cima e o valor inteiro obtido expressa a quantidade de PRBs necessários em 1 segundo (por isso a multiplicação por 1.000 TTIs), calculada pelo algoritmo de CAC, para que a conexão tenha garantias de QoS.

Com o resultado estimado de PRBs encontrados na Equação 4.8, é esperado que o escalonador seja capaz de reservar este número de PRBs no tempo de 1 segundo, considerando as exigências de atraso relacionadas ao QoS do tipo da conexão.

O número de PRBs estimados é comparado com o total de PRBs disponíveis (calculado na Equação 4.2) da seção relacionada à conexão: *handoff*, GBR ou non-GBR. Caso seja menor, a conexão é admitida. Do contrário, ela é rejeitada.

4.4.3 Alocação Dinâmica de Recursos

Quando uma conexão é admitida, o algoritmo de CAC proposto analisa a situação das demais seções. Os critérios analisados são o tamanho da seção e a taxa de ocupação. O tamanho da seção define quantos PRBs estão associados a uma seção naquele instante. Como o tamanho das seções é dinâmico, este valor varia ao longo do tempo. A taxa de ocupação de uma seção define a quantidade de PRBs associados a ela que já estão reservados para conexões anteriormente admitidas em relação ao total de PRBs associados a ela naquele instante de tempo. Ela é descrita em forma de porcentagem.

De acordo com o tamanho e as taxas de ocupação das outras seções, a seção que admitiu a conexão pode ser incrementada no valor de PRBs estimados para a conexão recém-admitida. Nesse caso, uma das outras duas seções será decrementada e os valores de taxa de ocupação, recalculados, de acordo com critérios que serão apresentados nas seções 4.4.3.1, 4.4.3.2 e 4.4.3.3.

Essa transferência de recursos entre as seções visa garantir um melhor aproveitamento dos recursos totais da célula de acordo com a demanda de conexões recebidas e representa a alocação dinâmica de recursos proposta pelo algoritmo de CAC. A ideia geral é fazer com que, ao longo do tempo, os recursos totais da célula sejam direcionados para os tipos de conexão com mais ocorrências [26]. Foram estabelecidos limites inferiores de tamanho das seções a fim de impedir que uma seção seja totalmente exaurida ao longo das alocações. Assim, o limite inferior da seção *handoff* é de 20% da banda total, da seção GBR é de 20% e da seção non-GBR é de 10% da banda total.

Eventualmente, durante a alocação dinâmica dos recursos, o tamanho das seções pode ficar levemente abaixo dos limites inferiores por conta do arredondamento dos cálculos.

As subseções seguintes deste capítulo apresentam as condições específicas de cada tipo de conexão para a execução da alocação dinâmica. Cada subseção traz também o pseudo-código da função que implementa a alocação dinâmica com o intuito de facilitar a compreensão. As notações e nomenclaturas utilizadas nos pseudo-códigos são descritas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Notações utilizadas nos pseudo-códigos das funções do algoritmo de CAC

| | |
|-----------------|---|
| RNec | Quantidade de PRBs necessários para a admissão da conexão |
| Rlim | Quantidade mínima de PRBs necessários para admissão de conexão non-GBR |
| TxOcup(handoff) | Taxa de ocupação da seção de <i>handoff</i> , em percentual |
| TxOcup(GBR) | Taxa de ocupação da seção GBR, em percentual |
| TxOcup(non-GBR) | Taxa de ocupação da seção non-GBR, em percentual |
| RRes(handoff) | Número de PRBs da seção de <i>handoff</i> reservados às conexões já admitidas |
| RRes(GBR) | Número de PRBs da seção GBR reservados às conexões já admitidas |
| RRes(non-GBR) | Número de PRBs da seção non-GBR reservados às conexões já admitidas |
| RTot(handoff) | Número total de PRBs da seção de <i>handoff</i> |
| RTot(GBR) | Número total de PRBs da seção GBR |
| RTot(non-GBR) | Número total de PRBs da seção non-GBR |
| RTot | Número total de PRBs da célula, englobando as 3 seções |
| B(handoff) | Extensão da seção de <i>handoff</i> , em percentual |
| B(GBR) | Extensão da seção GBR, em percentual |
| B(non-GBR) | Extensão da seção non-GBR, em percentual |

4.4.3.1 Chamada em *handoff*

Após a admissão de uma chamada em *handoff*, a taxa de ocupação da seção de *handoff* é atualizada. A seção será incrementada no valor de PRBs estimados anteriormente (RNec) para admissão da conexão caso uma das seguintes afirmações seja verdadeira, na seguinte ordem:

1. se a seção non-GBR for maior que 10% da banda total e a taxa de ocupação de *handoff* for maior que 20%, decrementa-se a seção non-GBR em RNec e incrementa-se a seção *handoff* em RNec. (Figura 4.2)
2. se a seção GBR for maior que 20%, se a taxa de ocupação GBR for menor que 60% e a taxa de ocupação de *handoff* for maior que 20%, decrementa-se a seção GBR em RNec e incrementa-se a seção de *handoff* em RNec. (Figura 4.3)

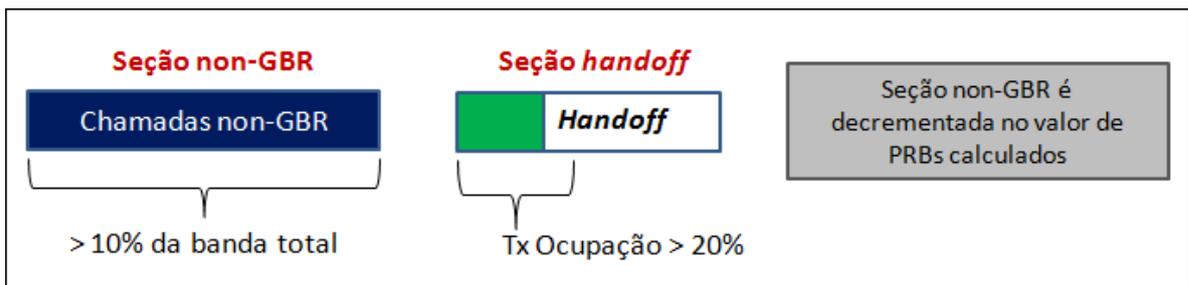


Figura 4.2: Cenário 1 para alocação dinâmica em chamadas em *handoff* (do próprio autor)

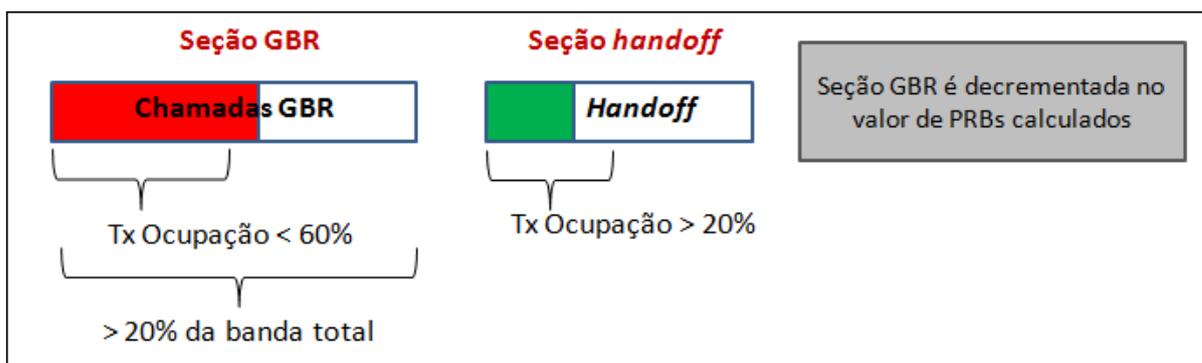


Figura 4.3: Cenário 2 para alocação dinâmica em chamadas em *handoff* (do próprio autor)

Caso tenha ocorrido alocação dinâmica, as taxas de ocupação e tamanho das seções envolvidas são devidamente recalculadas. Caso ambas as afirmações sejam falsas, não ocorre a alocação dinâmica de recursos.

O Algoritmo 1 providencia mais detalhes a respeito da alocação dinâmica neste caso.

Algoritmo 1: Alocação dinâmica de uma chamada em *handoff* recém-admitida

```
1: Após a admissão, o algoritmo atualiza a taxa de ocupação da seção de handoff:
2: TxOcup (handoff) = RRes(handoff)/ RTot(handoff) [%]
3: if ( B(non-GBR) > 10% )&&( TxOcup (handoff) )> 20% then
4:     RTot(non-GBR) - = RNec
5:     RTot(handoff) += RNec
6:     B(non-GBR) = RTot(non-GBR) / RTot [%]
7:     B(handoff) = RTot(handoff) / RTot [%]
8:     TxOcup (handoff) = RRes(handoff)/ RTot(handoff) [%]
9:     TxOcup (non-GBR) = RRes(non-GBR)/ RTot(non-GBR) [%]
10: else if (B(GBR) > 20%) &&( TxOcup(GBR) < 60% ) &&
    (TxOcup(handoff) > 20%) then
11:     RTot(GBR) - = RNec
12:     RTot(handoff) += RNec
13:     B(GBR) = RTot(GBR) / RTot [%]
14:     B(handoff) = RTot(handoff) / RTot [%]
15:     TxOcup (handoff) = RRes(handoff)/ RTot(handoff) [%]
16:     TxOcup (GBR) = RRes(GBR)/ RTot(GBR) [%]
17: end if
```

4.4.3.2 Conexão GBR

No caso de uma nova conexão GBR (VoIP ou Vídeo) admitida, a taxa de ocupação da seção GBR é atualizada. A seção GBR é incrementada no valor de PRBs estimados anteriormente (RNec) se uma das afirmações abaixo for verdadeira:

1. se a seção non-GBR for maior que 20% da banda total e a taxa de ocupação da seção GBR for maior que 30%, decrementa-se a seção Non-GBR em RNec (Figura 4.4)
2. Se a seção *handoff* for maior ou igual a 20% da banda total, se a taxa de ocupação de *handoff* for menor que 50% e a taxa de ocupação de conexões GBR

for maior que 30%, decrementa-se a seção de *handoff* em RNec e incrementa-se a seção GBR em RNec. (Figura 4.5)

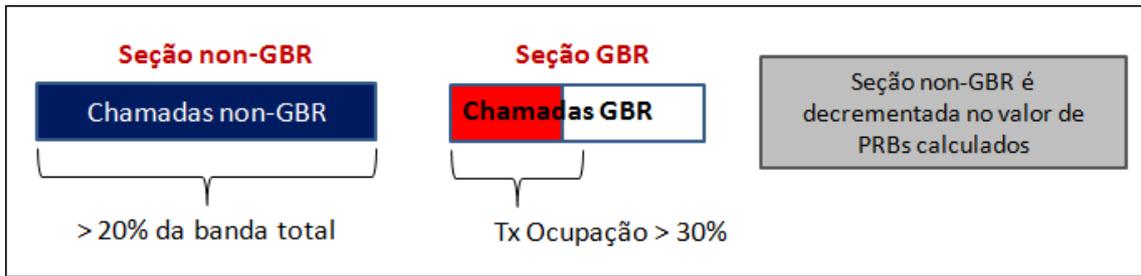


Figura 4.4: Cenário 1 para alocação dinâmica em chamadas GBR (do próprio autor)

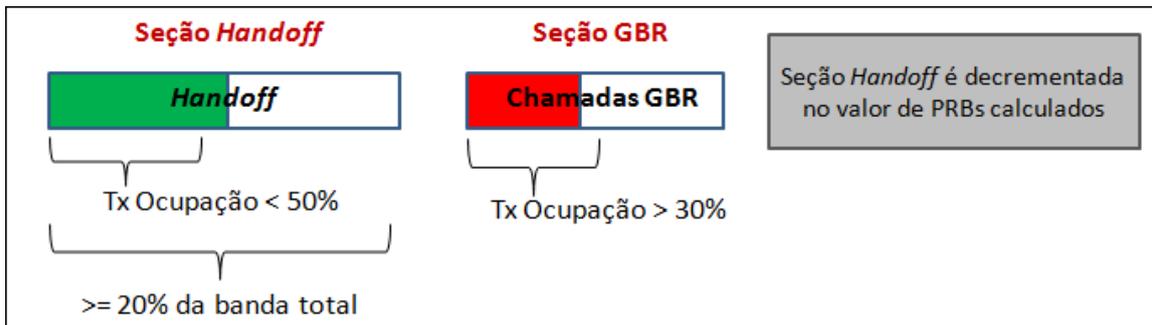


Figura 4.5: Cenário 2 para alocação dinâmica em conexões GBR (do próprio autor)

Caso tenha ocorrido alocação dinâmica, as taxas de ocupação das seções envolvidas são devidamente recalculadas.

O Algoritmo 2 providencia mais detalhes a respeito da alocação dinâmica neste caso.

Algoritmo 2: Alocação dinâmica de uma conexão GBR recém-admitida

- 1: Após a admissão, o algoritmo atualiza a taxa de ocupação da seção GBR:
- 2: $TxOcup(GBR) = RRes(GBR) / RTot(GBR) \text{ [%]}$
- 3: **if** ($B(non-GBR) > 20\%$) **&&** ($TxOcup(GBR) > 30\%$) **then**
- 4: $RTot(non-GBR) - = RNec$
- 5: $RTot(GBR) += RNec$
- 6: $B(GBR) = RTot(GBR) / RTot \text{ [%]}$
- 7: $B(non-GBR) = RTot(non-GBR) / RTot \text{ [%]}$
- 8: $TxOcup(GBR) = RRes(GBR) / RTot(GBR) \text{ [%]}$
- 9: $TxOcup(non-GBR) = RRes(non-GBR) / RTot(non-GBR) \text{ [%]}$
- 10: **else if** ($B(handoff) \geq 20\%$) **&&** ($TxOcup(handoff) < 50\%$) **&&**
 ($TxOcup(GBR) > 30\%$) **then**

```

11:      RTot(handoff) - = RNec
12:      RTot(GBR) += RNec
13:      B(GBR) = RTot(GBR) / RTot [%]
14:      B(handoff) = RTot(handoff) / RTot [%]
15:      TxOcup (GBR) = RRes(GBR)/ RTot(GBR) [%]
16:      TxOcup (handoff) = RRes(handoff)/ RTot(handoff) [%]
17:  end if

```

4.4.3.3 Conexão non-GBR

No caso de conexões non-GBR, ocorrem duas estimativas de PRBs necessários para admissão: uma das estimativas considera a taxa de dados de 512 kbps (RNec) e a outra a taxa mínima em que o CAC proposto se compromete a entregar, que é de 96 kbps (Rlim). Uma vez que a conexão non-GBR é admitida, a taxa de ocupação de sua respectiva seção é atualizada. A seção non-GBR é incrementada no valor de Rlim se uma das afirmações abaixo for verdadeira, na ordem apresentada:

1. se seção GBR for maior que 20%, se a taxa de ocupação de conexões GBR for menor que 60% e a taxa de ocupação de conexões non-GBR for maior que 40%, decrementa-se a seção GBR em Rlim e incrementa-se a seção non-GBR em Rlim. (Figura 4.6)
2. se a seção *handoff* for maior ou igual a 20%, se a taxa de ocupação de *handoff* for menor que 50% e a taxa de ocupação de conexões non-GBR for maior que 40%, decrementa-se a seção de *handoff* em Rlim e incrementa-se a seção non-GBR em Rlim. (Figura 4.7)

Caso tenha ocorrido alocação dinâmica, as taxas de ocupação das seções envolvidas são devidamente recalculadas.

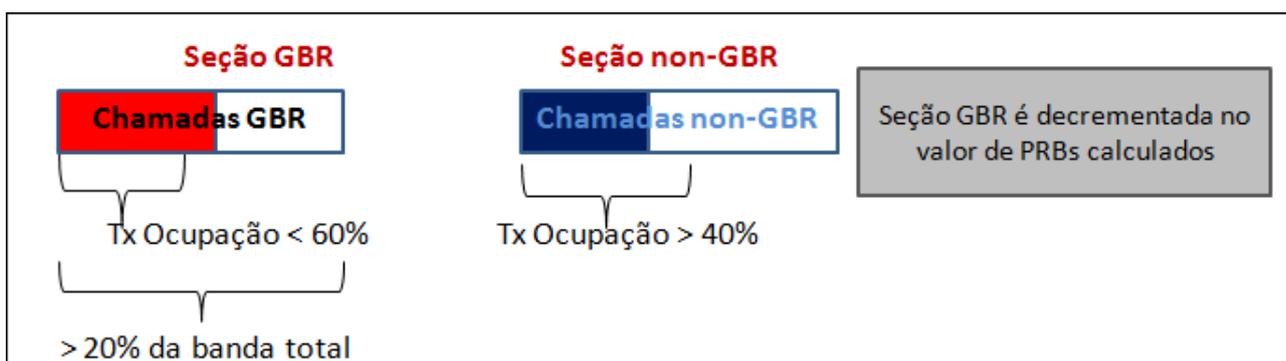


Figura 4.6: Cenário 1 para alocação dinâmica em chamadas non-GBR (do próprio autor)

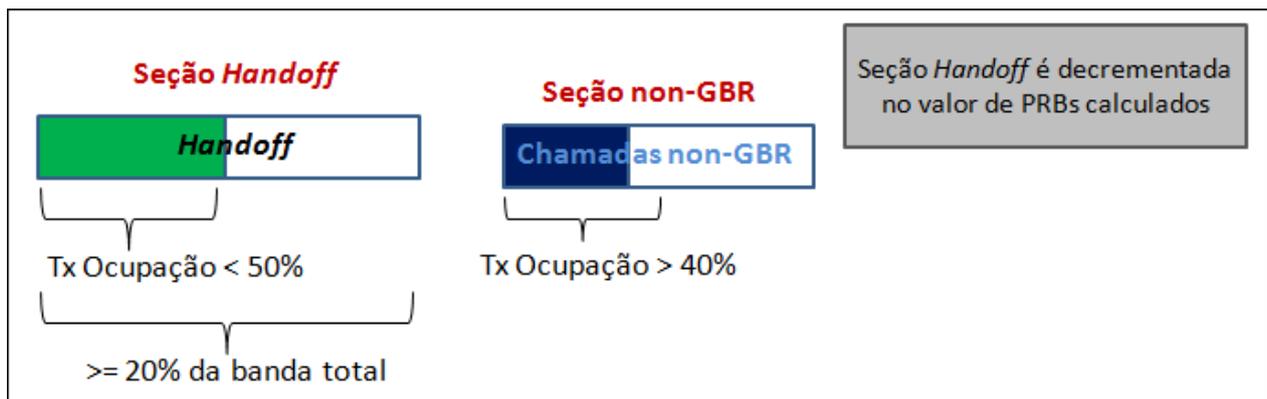


Figura 4.7: Cenário 2 para alocação dinâmica em chamadas non-GBR (do próprio autor)

O Algoritmo 3 providencia mais detalhes a respeito da alocação dinâmica neste caso.

Algoritmo 3: Alocação dinâmica de uma conexão non-GBR recém-admitida

- 1: Após a admissão, o algoritmo atualiza a taxa de ocupação da seção non-GBR:
- 2: $TxOcup(\text{non-GBR}) = RRes(\text{non-GBR}) / RTot(\text{non-GBR})$ [%]
- 3: **if**($B(\text{GBR}) > 20\%$) **&&**($TxOcup(\text{GBR}) < 60\%$) **&&** ($TxOcup(\text{non-GBR}) > 40\%$) **then**
- 4: $RTot(\text{GBR}) - = Rlim$
- 5: $RTot(\text{non-GBR}) += Rlim$
- 6: $B(\text{GBR}) = RTot(\text{GBR}) / RTot$ [%]
- 7: $B(\text{non-GBR}) = RTot(\text{non-GBR}) / RTot$ [%]
- 8: $TxOcup(\text{non-GBR}) = RRes(\text{non-GBR}) / RTot(\text{non-GBR})$ [%]
- 9: $TxOcup(\text{GBR}) = RRes(\text{GBR}) / RTot(\text{GBR})$ [%]
- 10: **else if** ($B(\text{handoff}) \geq 20\%$) **&&**($TxOcup(\text{handoff}) < 50\%$) **&&** ($TxOcup(\text{non-GBR}) > 40\%$) **then**
- 11: $RTot(\text{handoff}) - = Rlim$
- 12: $RTot(\text{non-GBR}) += Rlim$
- 13: $B(\text{handoff}) = RTot(\text{handoff}) / RTot$ [%]
- 14: $B(\text{non-GBR}) = RTot(\text{non-GBR}) / RTot$ [%]
- 15: $TxOcup(\text{non-GBR}) = RRes(\text{non-GBR}) / RTot(\text{non-GBR})$ [%]
- 16: $TxOcup(\text{handoff}) = RRes(\text{handoff}) / RTot(\text{handoff})$ [%]
- 17: **end if**

4.5 Execução da Preempção

Como já dito, a preempção de conexões é a liberação de recursos já reservados para posterior utilização. No algoritmo de CAC proposto, quando foram calculados os recursos necessários para uma determinada conexão que solicita admissão e ele percebe que não tem tais recursos disponíveis, antes de rejeitar sumariamente a conexão, ele tenta executar a preempção. A preempção de conexões visa liberar recursos de recursos apenas para novas conexões GBR (VoIP e Vídeo) e chamadas em *handoff*. As únicas conexões já admitidas que sofrem preempção são as conexões non-GBR, que podem ser executadas normalmente mesmo com menos recursos.

Como descrito na Seção 4.4.3.3, são feitas 2 estimativas de recursos para admissões de conexões non-GBR: uma considerando a taxa de 512 kbps e outra considerando a taxa de 96 kbps. Inicialmente, conexões non-GBR são admitidas considerando uma taxa máxima de 512 kbps. Após a admissão, uma *tag* para esta conexão é marcada em 0.

No cálculo realizado constantemente para a determinação dos valores de recursos de rádio reservados às conexões já admitidas, para todas as conexões non-GBR com a *tag* marcada em 0, é considerada a taxa de 512 kbps. Os cálculos para as conexões GBR sempre consideram as taxas especificadas pelos seus requisitos de QoS.

Durante a admissão de uma conexão, caso o algoritmo de CAC proposto perceba que não há recursos suficientes para uma conexão GBR ou conexão em *handoff*, ele executa a preempção. Uma a uma, cada conexão non-GBR tem o cálculo dos recursos necessários refeito, mas agora considerando a taxa mínima de 96 kbps.

A diferença entre os recursos reservados para a conexão com taxa de 512 kbps e os recursos necessários para a conexão com taxa de 96 kbps são imediatamente repassados para a respectiva seção relacionada à conexão que solicita admissão e um novo cálculo é realizado. Neste caso, a conexão non-GBR que cedeu recursos tem sua *tag* marcada em 1. Considera-se que conexões non-GBR marcadas em 1 não têm mais recursos para liberar em preempções futuras.

Um novo cálculo é refeito para verificar a disponibilidade de recursos de rádio para a admissão da conexão. Caso os recursos ainda não sejam suficientes, o algoritmo de CAC tenta realizar uma nova preempção com outra conexão non-GBR.

O mecanismo de preempção de conexões só é interrompido quando:

- tiver ocorrido a liberação de recursos suficientes para a admissão de uma conexão - nesse caso a conexão é admitida;
- todas as conexões non-GBR elegíveis para preempção já tiverem liberado seus recursos de reserva. Nesse caso, não havendo recursos necessários para a admissão da conexão que invocou o mecanismo de preempção, ela é rejeitada.

Uma chamada non-GBR em *handoff* também pode sofrer preempção no momento de sua admissão, caso não haja recursos disponíveis considerando a taxa de 512 kbps. Em caso de admissão, a *tag* desta conexão é automaticamente marcada em 1.

4.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou em detalhes as estratégias que o algoritmo de CAC proposto utiliza para alcançar resultados otimizados e o seu método de funcionamento.

Foi feita a descrição do problema, destacando que os padrões 3GPP não apresentam especificações do mecanismo de CAC. Além disso, os trabalhos encontrados na literatura relacionados ao Gerenciamento de Recursos destacam mais o escalonamento dos recursos de rádio do que os algoritmos de controle de admissão de chamadas, havendo assim relativa escassez de pesquisas ainda mais quando se considera chamadas em *handoff*.

Em seguida, foi apresentado o objetivo deste trabalho, que é propor um algoritmo de CAC que atenda o maior número de conexões possíveis e que seja focado principalmente na admissão de chamadas em *handoff*.

Na sequência do capítulo, foram descritas as três seções consideradas na divisão dos recursos totais da eNodeB e os critérios de classificação de uma conexão que solicita admissão. Foram apresentados os parâmetros e os cálculos realizados para estimar a quantidade de recursos de rádio que uma conexão em admissão necessita. Esses cálculos são usados para que o algoritmo de CAC proposto tenha condições de realizar a tomada de decisão: se admite ou rejeita a conexão.

Em seguida, foram detalhados em pseudo-códigos os mecanismos de alocação dinâmica de recursos para cada tipo de conexão, que proporcionam alterações na extensão das seções consideradas de acordo com a demanda de conexões.

O capítulo termina explorando o mecanismo de preempção de conexões, descrevendo seu funcionamento detalhadamente e apresentando os critérios que o ativam e os critérios que o finalizam.

Capítulo 5

Avaliação de Desempenho do Algoritmo de CAC Proposto

5.1 Introdução

Uma vez apresentada a proposta de algoritmo de CAC para redes LTE, este capítulo visa avaliar a eficácia de seus mecanismos e critérios de admissão por meio de modelagem e simulação. A avaliação de desempenho leva em consideração as principais classes de serviço especificadas pelo 3GPP e o tipo da conexão (nova conexão ou chamada em *handoff*) em cenários de redes tipicamente urbanos. Os resultados obtidos são comparados com os resultados de outras propostas de CAC amplamente conhecidas na literatura para comprovação de seu desempenho e sua relevância.

A Seção 5.2 descreve a ferramenta de simulação utilizada na avaliação de desempenho e os ambientes de rede considerados nas simulações. A Seção 5.3 apresenta algoritmos de CAC utilizados para comparação de desempenho, descreve suas estratégias para admissão e os parâmetros configurados nas simulações. A Seção 5.4 apresenta e analisa os resultados obtidos pelo algoritmo de CAC proposto bem como dos outros algoritmos de CAC para fins de comparação e avaliação de desempenho. A Seção 5.5 traz as considerações finais deste Capítulo.

5.2 Modelagem e Simulação

5.2.1 Ferramenta de Simulação

A ferramenta de simulação utilizada para análise de desempenho foi o LTE-Sim, um *framework opensource*, desenvolvido por Giuseppe Piro [59] em C++, suportado pelos principais sistemas operacionais existentes.

O LTE-Sim é um simulador orientado a eventos que abrange vários aspectos da rede LTE, incluindo E-UTRAN, EPS e UEs. Ele suporta tanto ambientes com uma única célula quanto com múltiplas células, além de ser capaz de simular o gerenciamento de QoS, mobilidade de usuário, processos de *handoff* e técnicas de reuso de frequência. Estratégias de escalonamento popularmente conhecidas (*Proportional Fair*, MLWDF, *Round Robin* entre outras), AMC, *feedbacks* de CQI e diversos modelos de camada física também foram projetados para ele [60].

Há quatro componentes principais, sendo que para cada um deles há uma classe dedicada:

- *Simulator*;
- *Network Manager*;
- *Flows Manager*;
- *Frame Manager*.

Três tipos de nós de rede são implementados pelo LTE-Sim e gerenciados pelo *Network Manager*:

- Usuários (UE);
- Estações-base (eNBs);
- Entidade MME e *Gateway* (MME/GW).

O LTE-Sim suporta alocação de recursos no domínio do tempo e da frequência. No domínio do tempo, os recursos são distribuídos a cada TTI (*Transmission Time Interval*), com 1 ms, distribuídos em 2 *slots* de 0,5 ms. No domínio da frequência, a

largura de banda é dividida em subcanais de 180 kHz, correspondente às 12 subportadoras consecutivas e igualmente espaçadas.

O LTE-Sim não implementa nenhum tipo de Controle de Admissão de Chamadas. Dessa forma, para a avaliação de desempenho do algoritmo de CAC proposto, foi necessário implementar essa funcionalidade no seu código.

De modo geral, tal funcionalidade considera:

- o tipo de conexão: se é uma chamada VoIP, de vídeo ou non-GBR;
- a condição da conexão: se é uma nova conexão ou uma chamada em andamento (*handoff*);
- o cálculo da estimativa dos recursos necessários para suportar os requisitos de QoS de uma conexão;
- o cálculo dos recursos disponíveis em cada seção definida pelo algoritmo de CAC a partir das estimativas de recursos necessários das conexões já admitidas;
- a preempção de conexões;
- a tomada de decisão sobre a admissão/rejeição de uma conexão, baseada em determinados critérios e/ou limiares previamente definidos;
- a documentação das tomadas de decisão realizadas sobre todas as conexões envolvidas na simulação para futuro registro gráfico, análise da eficácia do algoritmo de CAC e comparação com outros algoritmos.

Apesar de ter sido necessária a implementação da funcionalidade do CAC, o LTE-Sim foi escolhido como ambiente de simulação por sua relativa simplicidade, por ser focado exclusivamente na tecnologia LTE e por ter uma equipe de desenvolvedores ativa que mantém um fórum de discussão sobre a ferramenta sempre atualizado.

5.2.2 Ambiente e Parâmetros de Simulação

O modelo de simulação escolhido considera células de 1 km de raio e largura de banda de 5 MHz. Os UEs são gerados e incorporados ao ambiente de simulação de forma sucessiva e cada um é posicionado aleatoriamente dentro dos limites da célula da qual faz parte.

Embora sejam consideradas três células na simulação, o algoritmo de CAC proposto é analisado apenas na eNodeB da célula central. Todas as demais células foram geradas apenas com o propósito de simular o deslocamento de seus usuários para a célula central (*handoff*).

A Figura 5.1 apresenta o cenário geral do ambiente de simulação modelado, enfatizando o deslocamento de alguns UEs de células periféricas para a célula central (*handoff*).

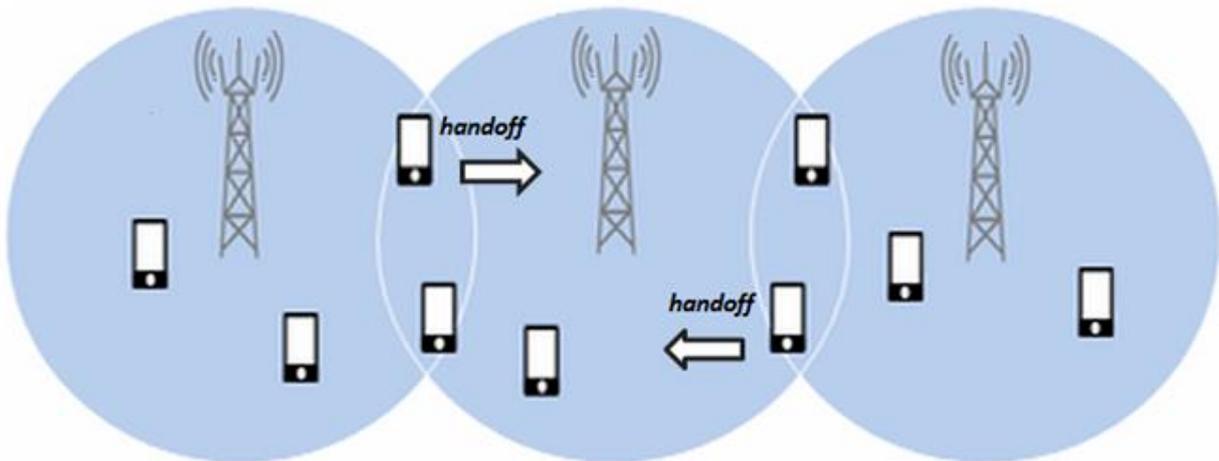


Figura 5.1: Cenário de rede considerado da simulação (do próprio autor)

A cada UE é atribuído um único tipo de conexão, que pode ser uma conexão de voz (VoIP), uma conexão de vídeo ou tráfego CBR. A distribuição das conexões durante o tempo de simulação, bem como a proporção dos tipos de conexão modelam cenários reais cotidianos [59]. Quando um UdisplacementE se desloca de uma célula periférica para a célula central, sua conexão passa a ser considerada uma chamada em *handoff* com a célula central, independente do tipo de conexão.

A velocidade de deslocamento dos UEs é de 3 km/h em direções aleatórias, de acordo com o modelo *Random Direction* definido em [59]. Os demais parâmetros de simulação estão dispostos na Tabela 5.1. Tais parâmetros foram selecionados por representarem adequadamente situações cotidianas do ambiente urbano e também por estarem presentes em muitos trabalhos encontrados na literatura, tais como [25], [32], [43], [3], [46] e [44].

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados nas simulações

| Parâmetros | Valores |
|---|--------------------------------------|
| Largura de Banda do Sistema: | 5 MHz |
| Espaçamento de Subportadora: | 15 kHz |
| Número de Subportadoras: | 12 |
| Núm. de <i>Resource Blocks</i> (por TTI): | 25 |
| Proporção de chamadas em <i>handoff</i> : | 1:3 |
| Duração do <i>frame</i> : | 10 ms |
| Número Total de Usuários: | 110 |
| Velocidade de Deslocamento: | 3 km/h |
| Tempo de Simulação: | 30.000 TTIs |
| Distribuição de conexões (por tipo): | 30% VoIP, 30% Vídeo, 40% conexão CBR |
| GBR (VoIP): | 40 kbps |
| GBR (Vídeo): | 128 kbps |
| Taxa CBR (<i>Best Effort</i>): | 512 kbps |
| Algoritmo de Escalonamento: | <i>Proportional Fair</i> |

As chamadas VoIP foram modeladas utilizando-se a Cadeia de Markov como processo estocástico de tempo discreto, com períodos ON/OFF. No período ON são enviados pacotes de 20 bytes a cada 20 ms. A duração do período ON é calculada a partir de uma distribuição exponencial com valor médio de 3 segundos. No período OFF, nenhum pacote VoIP é enviado. A duração do período OFF é calculada a partir de uma distribuição exponencial truncada com limite superior de 6,9 segundos e valor médio de 3 segundos. Todos os fluxos de dados das chamadas VoIP foram criados com base no padrão G.729, implementado no simulador LTE-Sim.

Os fluxos de dados das aplicações de vídeo são transmitidos a partir de um *streaming* de vídeo com taxa variável de no máximo 150 kbps e valor médio 128 kbps.

Os fluxos de dados non-GBR simulam todas as aplicações que não necessitam de taxa mínima de dados para o seu devido funcionamento. Ou seja, aplicações que mantêm a sua funcionalidade proposta e qualidade de experiência do usuário, mesmo quando a taxa de transmissão é reduzida. São exemplos de aplicações os serviços de *e-mail*, Web, transferência de arquivos entre outros. Todas as aplicações non-GBR utilizam o protocolo TCP. A modelagem dos fluxos non-GBR é realizada a partir de uma distribuição de Pareto com taxa inicial (e máxima) de 512 kbps. A preempção de conexões non-GBR prevê uma redução na taxa de transmissão de dados para até 96 kbps, de acordo com a necessidade de liberação de recursos de alocação de dados.

A Tabela 5.2 apresenta um resumo das informações relacionadas aos fluxos de dados utilizados nas simulações (VoIP, Vídeo e conexões non-GBR).

Tabela 5.2. Parâmetros gerais das Aplicações

| Tráfego | Tipo | QCI | Prioridade | GBR (kbps) | MBR (kbps) |
|---------|---------|-----|------------|------------|------------|
| VoIP | GBR | 1 | 2 | 40 | 40 |
| Video | GBR | 2 | 4 | 128 | 150 |
| non-GBR | non-GBR | 9 | 9 | 96 | 512 |

5.3 Outros Algoritmos de CAC Analisados

Como foi dito anteriormente, os resultados experimentais do algoritmo de CAC proposto foram avaliados através da comparação de desempenho com os resultados de outros algoritmos de CAC. Foram considerados 4 modelos experimentais para realizar a comparação e análise de desempenho do algoritmo de CAC proposto. O BCAC (*Basic CAC*) e o MSCAC (*Multi Service CAC*) são muito conhecidos na indústria e pesquisa [47] [61] [56]. O FCAC-P (*Flexible CAC with Preemption*) [44] utiliza como critério de

admissão ocupação da banda e probabilidade de bloqueio de conexões, além de contar também com o recurso de preempção de conexões. O CAC proposto estático considera toda a implementação do algoritmo de CAC proposto e descrito no capítulo anterior, exceto que a extensão de suas seções é estática durante todo o tempo de simulação.

Todos os algoritmos de CAC considerados também foram implementados no LTE-Sim, possibilitando simular as suas estratégias de gerenciamento de recursos e todos foram submetidos ao mesmo ambiente de simulação apresentado na subseção 5.2.2. A seguir, são apresentados cada um dos modelos de algoritmo de CAC utilizados para comparação com os resultados do algoritmo de CAC proposto.

5.3.1 *Basic CAC*

O *Basic CAC* (BCAC) é o algoritmo de admissão de conexões mais elementar [61]. Isso porque as únicas funções implementadas neste algoritmo são o cálculo dos PRBs necessários a uma conexão (de acordo com sua QoS) e a verificação da quantidade de PRBs disponíveis na estação-base. Assim sendo, o único critério utilizado para admissão de chamadas do BCAC é a disponibilidade integral de recursos na eNodeB. A admissão de conexões ocorre somente quando há PRBs suficientes para suprir a requisição da conexão. Caso contrário, ela é rejeitada. O BCAC não faz qualquer tipo de distinção em relação ao tipo de conexão ou se é uma nova conexão ou chamada em *handoff*. O objetivo de apresentar o desempenho do BCAC é destacar a relevância das estratégias de admissão propostas pelos outros algoritmos de CAC considerados neste trabalho através dos resultados superiores alcançados por eles.

5.3.2 *MSCAC – Multi Service CAC*

O MSCAC foi proposto em [47] e sua estratégia de tomada de decisão se baseia no tipo de conexão que solicita admissão, além de priorizar as chamadas em *handoff*. Ele trabalha com seções exclusivas de largura pré-definida e também leva em consideração a qualidade do canal da conexão.

O MSCAC define dois tipos de conexão: conexões RT (*real time*) e conexões NRT (*non-real time*). Chamadas VoIP e de vídeo são classificadas como conexões RT e têm

demandas específicas de QoS. Tais conexões são equivalentes às conexões GBR, descritas no algoritmo de CAC proposto. Da mesma forma, conexões NRT são equivalentes às conexões non-GBR, englobando conexões Web e FTP.

O algoritmo divide os recursos da estação-base em duas seções: seção RT e seção NRT. Como o MSCAC também analisa a qualidade do canal da conexão, a seção RT é subdividida em outras 2 subseções, denominadas *Good Channel* e *Bad Channel*. Uma conexão com boa qualidade de canal, acima de um limiar pré-definido pelo algoritmo, é classificada como *Good Channel*. Já uma conexão cuja qualidade de canal esteja abaixo do limiar é classificada como *Bad Channel*. Finalmente, a subseção *Good Channel* ainda é subdividida em outras 2 subseções: uma parte para chamadas VoIP e a outra parte para conexões de vídeo. Somente as conexões RT são classificadas em *Good Channel* e *Bad Channel*. A seção NRT não é subdividida. A Figura 5.2 ilustra a distribuição de recursos da estação-base nas diversas seções do algoritmo MSCAC.

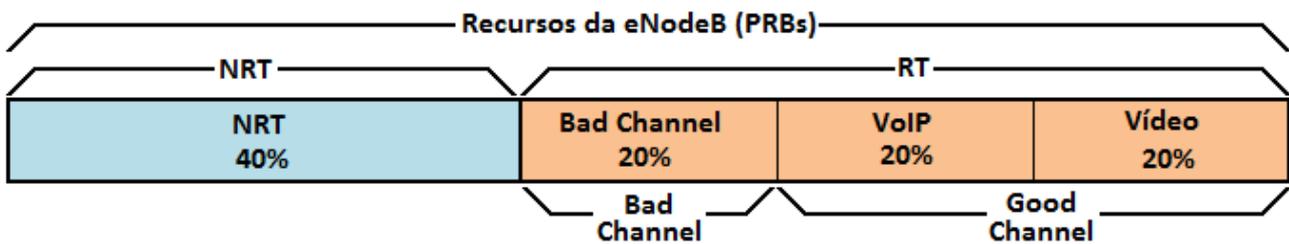


Figura 5.2: Distribuição de recursos nas seções do algoritmo MSCAC (do próprio autor)

A qualidade do canal de uma conexão RT é avaliada com base na Eficiência Espectral calculada pelo algoritmo no momento da solicitação de admissão. Caso a Eficiência Espectral da conexão esteja acima de um limiar pré-definido pelo algoritmo (Eff_{th}), a conexão é classificada como *Good Channel*. Caso contrário, ela é classificada como conexão *Bad Channel*.

Uma conexão *Bad Channel* só é admitida se houver recursos suficientes na subseção *Bad Channel*. Uma chamada VoIP *Good Channel* é admitida se houver recursos suficientes na subseção VoIP ou, em última instância, na subseção *Bad Channel*. Da mesma forma, uma conexão de vídeo *Good Channel* só é admitida caso haja recursos suficientes na subseção de vídeo ou na subseção *Bad Channel*. Conexões NRT são admitidas apenas se houver recursos suficientes na parte NRT.

A distribuição de recursos entre os tipos de conexão adotada em [47] pelo algoritmo MSCAC foi a seguinte: 40% dos recursos para conexões NRT, 20% dos recursos para *Bad Channel*, 20% dos recursos para chamadas VoIP e 20% para conexões de Vídeo. O limiar Eff_{th} de Eficiência Espectral definido foi de 0,4.

5.3.3 FCAC-P - *Flexible CAC with Preemption*

O algoritmo FCAC-P foi proposto em [44] e utiliza os conceitos de probabilidade e limiar para auxiliar na tomada de decisão sobre a admissão de conexões. O FCAC-P também classifica as conexões em conexões RT (*real time*) e conexões NRT (*non-real time*). No entanto, ao contrário do algoritmo de CAC proposto e do algoritmo MSCAC, o FCAC-P não trabalha com seções cujos recursos sejam exclusivos a esses tipos de conexão. Ao invés disso, cada tipo de conexão está associado a um limiar de ocupação da banda total. Foi definido também um limiar de ocupação de banda para conexões RT classificadas como *Bad Channel*, que são conexões cuja eficiência espectral do canal esteja menor que um valor de eficiência espectral pré-definido como Eff_{th} . Os limites de ocupação de banda total são definidos como NRT_{th} , RT_{th} , BC_{th} para conexões NRT, conexões RT e conexões *Bad Channel*, respectivamente.

Uma conexão NRT que solicite admissão é automaticamente admitida quando a ocupação total da banda é menor que o limiar NRT_{th} . Caso seja maior, o algoritmo verifica se há recursos suficientes para admissão da conexão. Mesmo havendo recursos suficientes, há uma probabilidade de bloqueio BR_{NRT} (*blocking rate* de conexões NRT) da conexão.

Para conexões RT, o FCAC-P leva em consideração primeiramente a qualidade do canal, classificando-a em *Good Channel* ou *Bad Channel*. Conexões RT com má qualidade de canal (*bad channel*) só são admitidas se a ocupação total da banda for menor do que seu limiar de ocupação BC_{th} . Conexões RT com boa qualidade de canal (*good channel*) são admitidas automaticamente quando a ocupação total da banda é menor que o limiar RT_{th} . Caso seja maior, o algoritmo verifica se há recursos suficientes para sua admissão. Como ocorre com conexões NRT, mesmo havendo recursos suficientes para admissão da conexão, há uma probabilidade de bloqueio BR_{RT} (*blocking rate* de conexões RT) da conexão.

Se a conexão RT estiver em *handoff*, independente se for classificada como *good channel* ou *bad channel*, ela é automaticamente admitida se houver recursos suficientes. Essa é a forma com a qual o FCAC-P prioriza as chamadas em *handoff*.

Os valores das probabilidades de bloqueio BR_{NRT} e BR_{RT} permitem flexibilidade às operadoras em favorecer um tipo ou outro de conexão.

O FCAC-P, como o próprio nome sugere, também realiza a preempção de conexões NRT, caso os recursos da estação-base estejam escassos. Sempre que o algoritmo percebe que não há recursos suficientes para a admissão de conexões RT, ele verifica se há a possibilidade de executar a preempção nas conexões NRT já admitidas. Em caso positivo, a preempção é executada, disponibilizando mais recursos para novas admissões.

Os parâmetros considerados para o algoritmo FCAC-P durante as simulações foram: $NRT_{th} = 50\%$, $RT_{th} = 90\%$, $BC_{th} = 60\%$, $BR_{NRT} = 0,2$, $BR_{RT} = 0,01$ e $Eff_{th} = 0,4$

5.3.4 Algoritmo de CAC com Reserva Estática de Recursos

A fim de testar a relevância da estratégia de reserva dinâmica no desempenho do algoritmo de CAC proposto, foi implementado o mesmo algoritmo de CAC com seções estáticas para os tipos de conexão considerados, que foi denominado de Algoritmo de CAC com reserva estática de recursos. Os parâmetros deste algoritmo de CAC são os mesmos utilizados para o algoritmo de CAC proposto, mas o tamanho inicial das seções reservadas às conexões se mantém fixo durante toda a simulação.

5.4 Resultados Experimentais

Com base nos parâmetros estabelecidos para o cenário de simulação e aplicações, foram feitas diversas rodadas de simulação com cada um dos algoritmos apresentados, a fim de comparar e analisar os seus desempenhos.

Em todas as simulações, os UEs foram sendo incorporados ao longo do tempo segundo um modelo de Poisson modulado por uma Cadeia de Markov até o limite

máximo de 110 usuários. As conexões se mantiveram ativas até o fim da rodada de simulação. Cada rodada de simulação teve uma duração de 30 segundos.

Os resultados a seguir consideram 40 rodadas de simulação para cada um dos algoritmos, sendo apresentados os valores médios dos resultados obtidos. O número de rodadas de simulação foi estabelecido com o objetivo de produzir um intervalo de confiança de 95% e garantir conclusões concretas nas interpretações dos resultados.

Os parâmetros avaliados nas simulações foram:

- Perda de chamadas em *handoff*;
- Bloqueio de novas conexões;
- Número total de conexões admitidas;
- Número total de conexões admitidas por tipo de conexão.

Como os parâmetros levam em consideração a demanda de conexões que solicitam admissão na célula central, o eixo horizontal dos gráficos foi substituído pelo valor médio de conexões totais nas rodadas de simulação, considerando todos os algoritmos testados.

5.4.1 Avaliação dos Algoritmos de CAC em Relação à Probabilidade de Perda de Chamadas em *Handoff*

Nesta seção são apresentados, analisados e comparados os resultados referentes ao desempenho de cada um dos algoritmos de CAC considerados no que se refere à probabilidade de perda de chamadas em *handoff*.

Uma chamada em *handoff* é uma conexão que já está em andamento, mas se moveu de uma célula para outra e necessita de admissão em uma nova eNodeB, para que o usuário não seja desconectado. Como já discutido, do ponto de vista do usuário, a perda de uma conexão em andamento é mais frustrante do que a impossibilidade de iniciar uma nova conexão. Sendo assim, a minimização da probabilidade de perda de chamadas em *handoff* é uma otimização desejável nos algoritmos de CAC atuais.

Conforme visto em [36] e [62], a probabilidade de perda de chamada em *handoff* é calculada a partir da razão entre o número acumulado de chamadas em *handoff* que foram perdidas (rejeitadas) por indisponibilidade de recursos e o número de conexões totais consideradas.

Na Figura 5.3 são apresentadas as probabilidades de perda de chamadas em *handoff* de cada um dos algoritmos de CAC considerados, ao longo do tempo de simulação e de acordo com a distribuição de tráfego proposta.

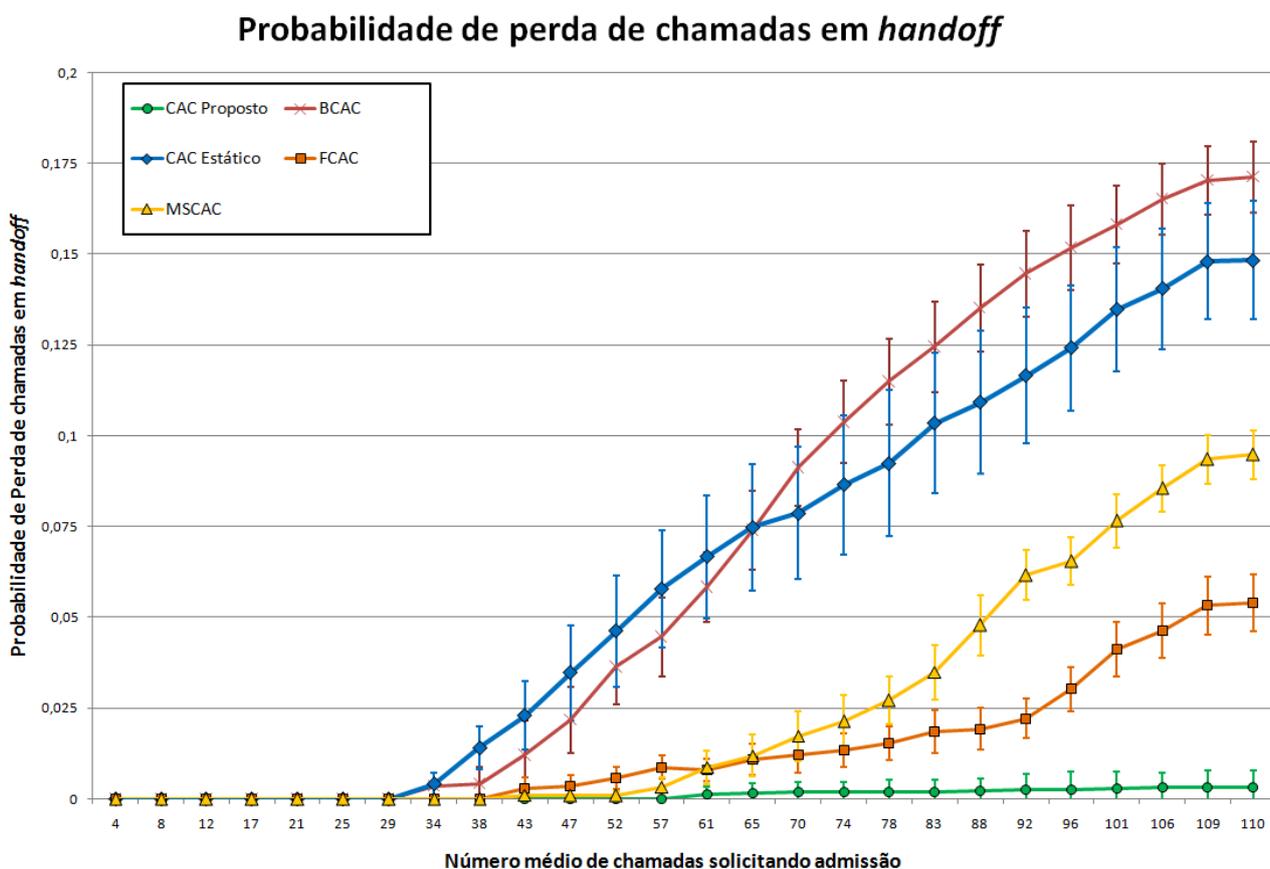


Figura 5.3: Comparação entre as probabilidades de perdas dos diferentes algoritmos de CAC

No início das simulações, a eNodeB conta com todos os seus recursos disponíveis, de forma que as primeiras conexões serão garantidamente admitidas. Com o passar do tempo, à medida que esses recursos vão sendo alocados às conexões que solicitam admissão e se tornam escassos, algumas delas serão sumariamente rejeitadas pelos algoritmos de CAC.

Como é possível ver no gráfico da Figura 5.3, até por volta da trigésima conexão, a eNodeB tem recursos suficientes para admitir qualquer conexão, independente de seu

tipo. Sendo assim, todos os algoritmos de CAC simplesmente confirmarão a disponibilidade de recursos e admitirão as conexões.

A partir da trigésima conexão, os recursos se tornam escassos e cada um dos algoritmos de CAC terá que pôr em prática suas estratégias de gerenciamento de recursos, a fim de admitir o maior número de conexões sem comprometer a qualidade de serviço das conexões já admitidas.

No gráfico da Figura 5.3, podemos perceber que o algoritmo de CAC proposto com reserva estática possui o pior desempenho a partir da trigésima conexão, pelo tamanho inicial da seção de chamadas em *handoff* ser relativamente pequeno (apenas 20%) e estático. Sendo assim, é natural esperar que ele tivesse um desempenho sofrível em relação aos demais algoritmos de CAC. Uma vez que todos os recursos de sua seção para chamadas em *handoff* estejam alocados, ele rejeitará todas as demais chamadas em *handoff*. Um resultado mais satisfatório poderia ser encontrado aumentando a seção de recursos para chamadas em *handoff*.

O algoritmo *Basic CAC* (BCAC) também possui um resultado sofrível em relação aos demais algoritmos por conta de sua simplicidade. Como todos os recursos são igualmente compartilhados entre todas as conexões que solicitam admissão, sem nenhum outro critério, ele é incapaz de priorizar as chamadas em *handoff*. Inicialmente ele apresenta um resultado melhor do que o algoritmo de CAC com reserva estática, pois todos os seus recursos são compartilhados e ele tem condições de admitir mais chamadas em *handoff* do que o algoritmo de CAC com reserva estática. Com o passar do tempo, à medida que os recursos vão sendo alocados para outras conexões, ele passa a rejeitar as chamadas em *handoff*. Ao fim de todas as rodadas de simulação, ele apresentou o pior resultado entre todos os algoritmos de CAC apresentados. O algoritmo MSCAC teve um resultado mediano como era de se esperar, porque a sua estratégia de gerenciamento de PRBs não considera nenhuma priorização em relação às chamadas em *handoff* e sim ao tipo de cada conexão que solicita admissão.

O algoritmo FCAC-P, notavelmente conhecido por sua baixa probabilidade de perdas, apresentou um resultado positivo principalmente pelos valores dos parâmetros escolhidos por seus autores e também porque prioriza explicitamente chamadas em *handoff*. Mesmo assim, ainda apresentou um desempenho inferior ao algoritmo de CAC proposto.

Finalmente, o algoritmo de CAC proposto neste trabalho apresentou o melhor desempenho em relação aos demais algoritmos. Primeiramente, porque ele foi projetado com este propósito: priorizar chamadas em *handoff*. Como as chamadas em *handoff* possuem uma seção exclusiva de recursos e as seções são dinâmicas, à medida que a demanda de chamadas em *handoff* cresce, cresce também a largura da seção deste tipo de conexão, possibilitando novas admissões no futuro. A priorização das chamadas em *handoff* é caracterizada pelas regras condicionais analisadas sempre que uma chamada em *handoff* é admitida. Mesmo que uma chamada em *handoff* solicite admissão e não haja recursos disponíveis em sua seção, o algoritmo de CAC proposto é capaz de eventualmente promover a preempção das conexões non-GBR, liberando mais recursos a fim de possibilitar mais admissões. Consequentemente, conforme se observa no gráfico da Figura 5.3, a probabilidade de perda do algoritmo de CAC proposto é próxima do zero, mesmo considerando recursos limitados.

5.4.2 Avaliação dos Algoritmos de CAC em Relação à Probabilidade de Bloqueio de Conexões

Nesta seção analisa-se o desempenho do algoritmo de CAC proposto em relação aos demais algoritmos de CAC já apresentados em termos de probabilidade de bloqueio de conexões.

Muitas vezes, um usuário quer se conectar a um determinado serviço (por exemplo, realizar uma chamada VoIP) e não consegue por escassez de recursos da eNodeB. Este impedimento é definido como Bloqueio de Conexão. O bloqueio de uma conexão implica negativamente à qualidade de experiência do usuário. Como a escassez momentânea de recursos pode estar relacionadas às estratégias de admissão de um CAC, é dito que quanto menor a probabilidade de bloquear uma conexão, mais eficiente é o algoritmo de CAC.

A probabilidade de bloqueio de conexões é definida como a razão do número de conexões bloqueadas pelo número de conexões totais [36].

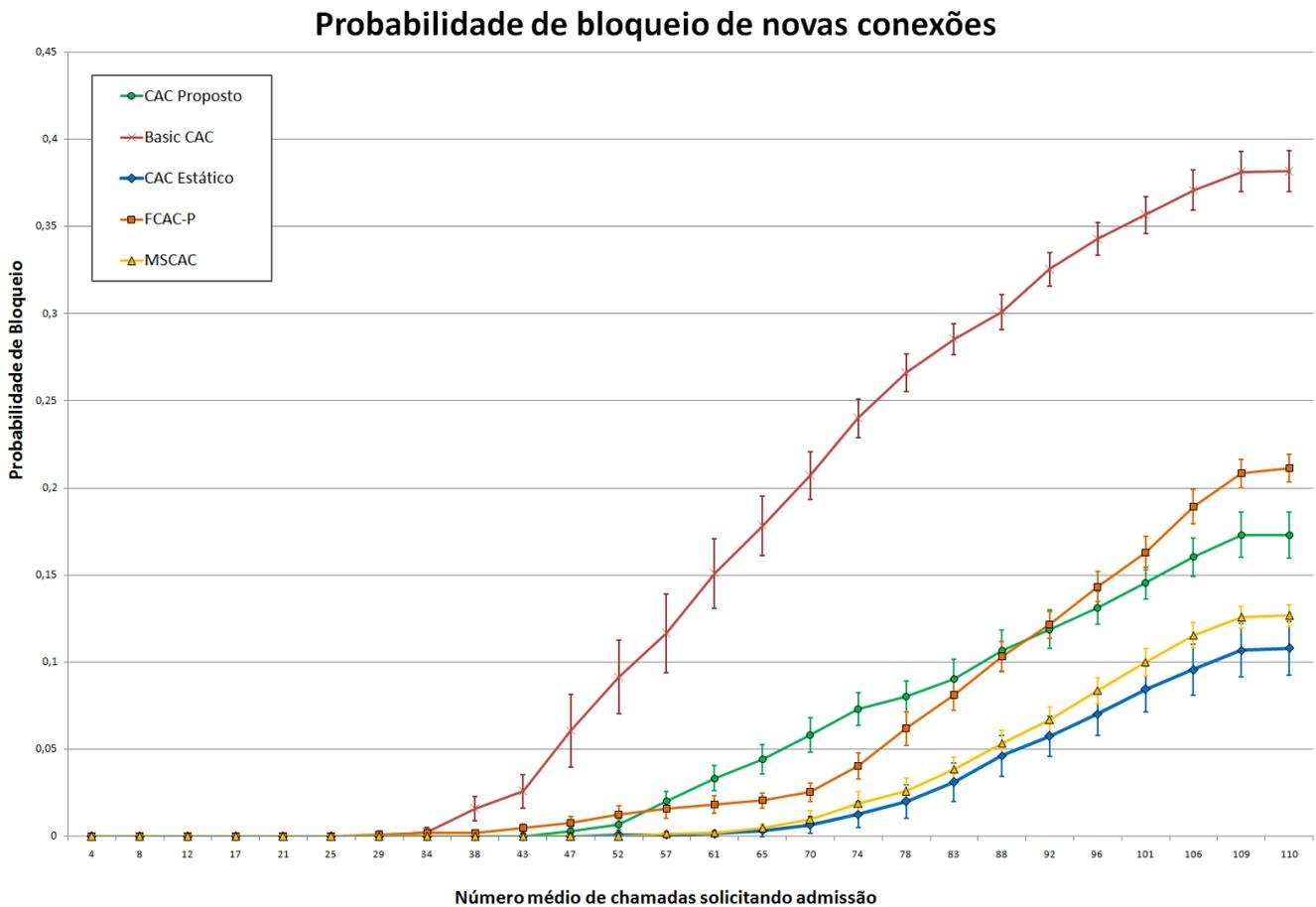


Figura 5.4: Comparação entre as probabilidades de bloqueios dos diferentes algoritmos de CAC

Os resultados apresentados na Figura 5.4 apresentam a probabilidade de bloqueio de novas conexões ao longo do tempo, de acordo com a distribuição de tráfego aplicada às simulações.

O algoritmo *Basic CAC* apresentou o pior resultado, pois não tem nenhum mecanismo inteligente para gerenciamento dos recursos da eNodeB. Assim, não havendo recursos suficientes para o atendimento da conexão, ele sumariamente a rejeita.

O algoritmo de CAC proposto na forma estática obteve o melhor resultado, pois a distribuição de recursos utilizada nas simulações foi eficaz para admitir a demanda de novas conexões. No entanto, isso apenas compensa parcialmente o desempenho inferior que ele obteve na admissão de chamadas em *handoff*, visto na seção 5.4.1.

O algoritmo de CAC proposto apresentou um desempenho mediano em relação aos demais justamente por priorizar as chamadas em *handoff*. É interessante notar que inicialmente, seu desempenho é inferior ao desempenho do algoritmo FCAC-P. No entanto, a partir do momento em que são executadas as preempções das conexões já admitidas, o seu resultado melhora, já que novos recursos são liberados para novas admissões. Próximo à nonagésima conexão considerada, ele passa a apresentar um resultado superior ao FCAC-P.

O mecanismo de reserva de recursos para conexões com má qualidade de canal do algoritmo MSCAC garantiu um resultado notável em relação aos demais, uma vez que as conexões bloqueadas foram aquelas que demandariam mais recursos da eNodeB.

5.4.3 Avaliação dos Algoritmos de CAC em Relação ao total de Conexões Admitidas

Esta seção analisa o desempenho dos algoritmos de CAC apresentados em relação ao número total de conexões admitidas durante o tempo de simulação. Obviamente, o algoritmo de CAC capaz de admitir mais conexões é aquele que melhor conseguiu gerenciar os limitados recursos de rede e obteve assim o melhor desempenho, desde que não tenha comprometido os requisitos de QoS necessários de cada uma delas. Como é de se esperar, um algoritmo de CAC que permite um número maior de admissões eficazes de conexões proporciona uma vantagem considerável às operadoras, já que ela se torna capaz de atender um número maior de usuários.

O gráfico da Figura 5.5 apresenta os resultados referentes ao número total de conexões admitidas por algoritmo de CAC apresentado neste trabalho.

Até por volta de oito segundos, os resultados entre os algoritmos de CAC são semelhantes, uma vez que todos os recursos da eNodeB estão disponíveis. A partir daí, os recursos vão se tornando escassos, havendo a necessidade de que cada um dos algoritmos de CAC coloquem em prática as suas estratégias para gerenciamento de recursos.

Como o algoritmo BCAC (*Basic CAC*) não possui qualquer estratégia de gerenciamento inteligente dos recursos da eNodeB, é de se esperar que ele obtivesse o pior desempenho entre os demais. Uma vez que o único critério para admissão de conexões deste CAC é a disponibilidade integral de recursos na eNodeB para a conexão que solicita admissão, em pouco tempo eles se tornam escassos, principalmente por conta da demanda das conexões non-GBR.

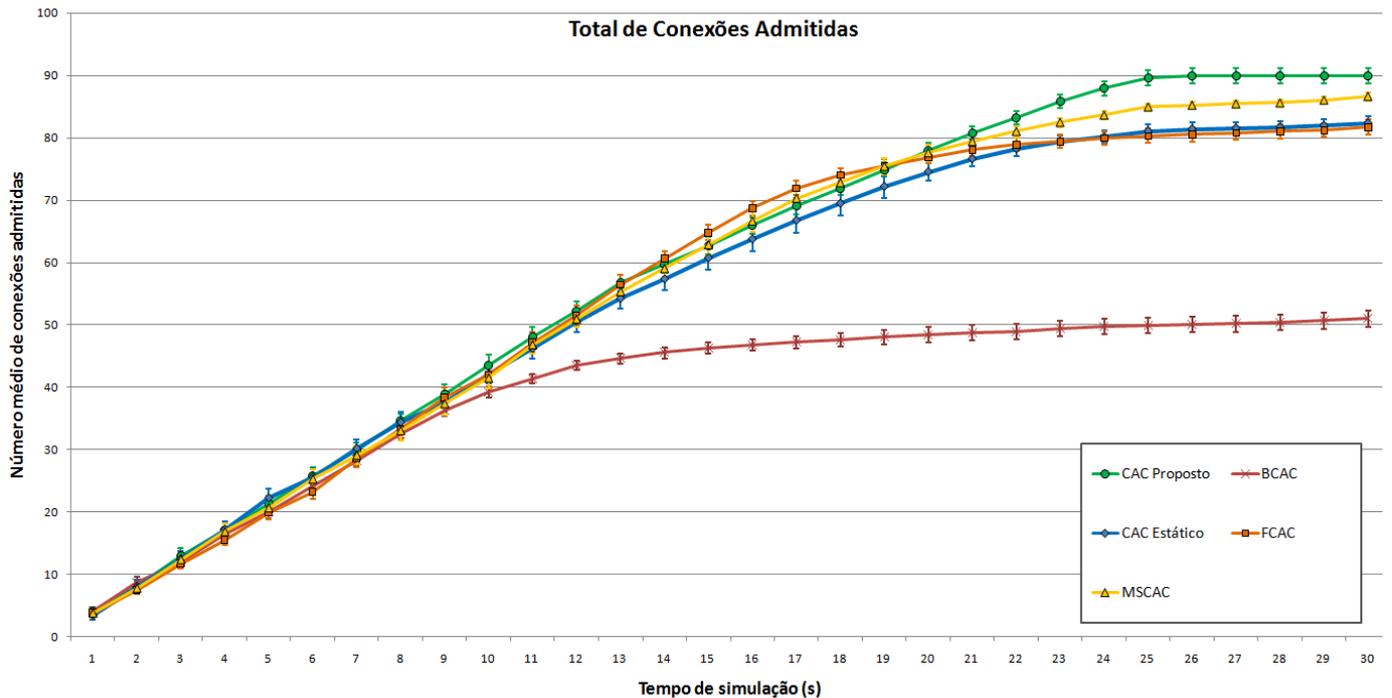


Figura 5.5: Número de conexões totais admitidas x tempo de simulação

Considerando o gráfico dos demais algoritmos de CAC, eles apresentaram um desempenho similar no número total de admissões de conexões até por volta dos 21 segundos. A partir daí, com os recursos ainda mais escassos, as estratégias de estimação de recursos de cada um dos algoritmos de CAC evidenciaram a sua eficácia no que se refere ao número de conexões que conseguiram admitir.

O algoritmo de CAC proposto obteve o melhor desempenho, sendo capaz de admitir o maior número de conexões em relação aos demais ao longo do tempo. Esse resultado foi possível graças à preempção de conexões non-GBR, associada à divisão inicial dos recursos da eNodeB nas seções para cada tipo de conexão e a maneira pela qual esses recursos foram sendo transferidos de uma seção para outra ao longo do tempo.

O algoritmo MSCAC obteve, em média, a admissão de um total de 87 conexões, enquanto os algoritmos FCAC-P e algoritmo de CAC com reserva estática admitiram um número menor, cada um com um total de 82 conexões, em média. O algoritmo de CAC com reserva estática obteve um número menor de conexões admitidas porque a maioria de suas admissões foram conexões non-GBR, que consomem mais recursos. Já o algoritmo FCAC-P obteve um número menor de admissões por rejeitar conexões com má qualidade de canal, independente da disponibilidade de recursos.

5.4.4 Avaliação dos Algoritmos de CAC em Relação ao Número Total de Conexões Admitidas por Tipo de Conexão

Nos gráficos apresentados a seguir, são analisados os números de conexões admitidas, bloqueadas e perdidas, levando em consideração o tipo de conexão: GBR (chamadas VoIP e de vídeo) e non-GBR.

Essa disposição dos resultados permite analisar o comportamento de cada um dos algoritmos de CAC apresentados em relação ao cenário proposto, assim como suas prioridades de admissão e restrições por conta das estratégias de gerenciamento de recursos adotadas.

No gráfico da Figura 5.6, as colunas representam o número de chamadas VoIP admitidas, bloqueadas e perdidas para cada um dos algoritmos de CAC analisados. São consideradas 33 chamadas VoIP nas rodadas de simulação.

O algoritmo MSCAC obteve o melhor resultado entre os demais, admitindo todas as chamadas VoIP (novas conexões e chamadas em *handoff*). Isso se deve ao fato do algoritmo ter uma seção exclusiva para as chamadas VoIP e os recursos alocados nessa seção terem sido suficientes para atender todas as solicitações de chamada VoIP.

O algoritmo de CAC proposto teve o segundo melhor desempenho, com apenas o bloqueio de 2 novas chamadas VoIP e nenhuma perda de chamada em *handoff*. Isso está de acordo com a proposta inicial do algoritmo, de priorizar as conexões GBR, em especial as chamadas em *handoff*.

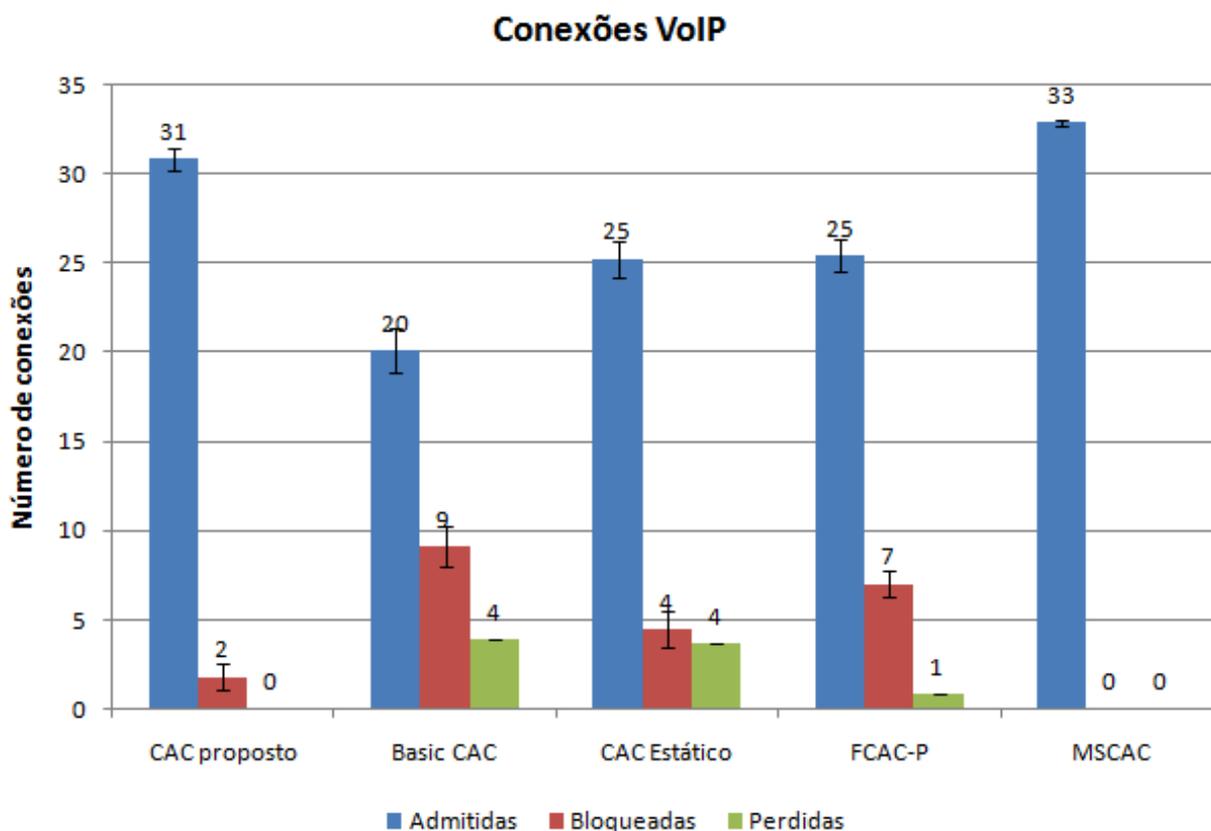


Figura 5.6: Chamadas VoIP admitidas x bloqueadas x perdidas

As estratégias do algoritmo FCAC-P, também priorizam chamadas em *handoff*, mas seu mecanismo de preempção não foi capaz de evitar a perda de uma conexão e o bloqueio de 7 novas chamadas VoIP. Ele teve um resultado semelhante ao do algoritmo de CAC com reserva estática, embora este último tenha sofrido mais perda de conexões. O número relativamente alto de rejeições de novas conexões se deve à qualidade de canal dessas chamadas, já que o algoritmo de CAC leva em consideração esta variável para tomada de decisão de admissão.

E como já era previsto, o algoritmo *Basic CAC* obteve o pior desempenho, com o maior número de bloqueios e perdas de chamadas VoIP, pois uma vez que seus recursos tenham sido alocados, as conexões de qualquer tipo que solicitem admissão serão sumariamente rejeitadas.

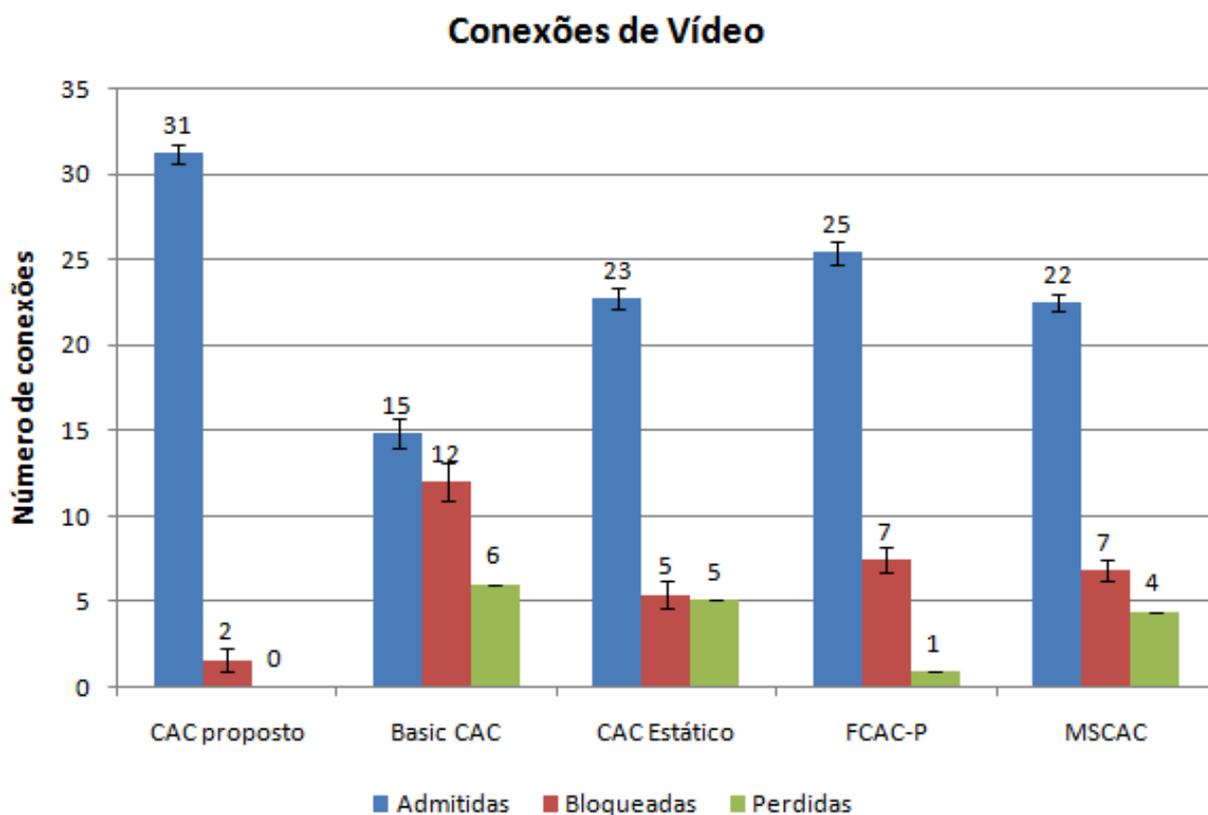


Figura 5.7: Conexões de vídeo admitidas x bloqueadas x perdidas

O gráfico da Figura 5.7 apresenta o resultado dos algoritmos de CAC analisados neste trabalho, referente às conexões de vídeo. As colunas representam o número de conexões admitidas, bloqueadas e perdidas respectivamente. São consideradas 33 conexões de vídeo nas rodadas de simulação.

O algoritmo de CAC proposto obteve, com êxito, o melhor resultado, tendo apenas 2 novas conexões de vídeo bloqueadas em momentos de sobrecarga de rede e nenhuma conexão perdida. Mais uma vez, isso demonstra a preocupação no desenvolvimento do algoritmo de CAC proposto de apresentar uma estratégia eficiente que privilegie conexões GBR e sobretudo as chamadas em *handoff*. De fato, o algoritmo de CAC proposto praticamente não obteve nenhuma perda de conexões GBR (VoIP e Vídeo) nas simulações que foram realizadas.

O algoritmo MSCAC obteve o pior desempenho entre os demais algoritmos, com exceção do *Basic CAC* do qual já se esperava o pior resultado. Isso demonstra que a largura da seção destinada às conexões de vídeo e a largura da seção RT para *Bad Channel* não foram configuradas adequadamente para suprir a demanda do cenário utilizado. Houveram 7 conexões bloqueadas e 4 chamadas em *handoff* perdidas. Caso o

algoritmo de CAC em questão fizesse uso da preempção das conexões non-GBR, provavelmente obteria um melhor resultado.

O algoritmo FCAC-P obteve um desempenho mediano, com o maior número de admissões de conexões de vídeo depois do algoritmo de CAC proposto, mas com um número relativamente grande de bloqueios (7 bloqueios) e 1 perda de chamada em *handoff*. Mais uma vez, o alto número de rejeições de conexões de vídeo se deve à qualidade do canal das mesmas, uma vez que o algoritmo de CAC considera esta variável como critério de admissão.

O algoritmo de CAC com reserva estática obteve um desempenho muito aquém quando comparado com o algoritmo de CAC proposto, já que as conexões de vídeo só são admitidas caso haja recursos em sua respectiva seção. Esse desempenho evidencia a importância de desenvolver uma estratégia de gerenciamento de recursos que seja capaz de alterar a largura das seções exclusivas de cada tipo de conexão de acordo com a tendência das demandas de conexões.

O gráfico da Figura 5.8 apresenta os resultados referentes ao desempenho dos algoritmos de CAC apresentados quanto à admissão, bloqueio e perda de conexões non-GBR. São consideradas 44 conexões non-GBR nas rodadas de simulação.

O algoritmo de CAC com reserva estática conseguiu o melhor resultado em relação à admissões porque todas as preempções de novas conexões non-GBR já admitidas liberam recursos exclusivamente para a admissão de outras novas conexões non-GBR. Consequentemente, isso explica o baixo número de conexões bloqueadas. No entanto, os recursos liberados devido às preempções de conexões non-GBR em *handoff* já admitidas são compartilhados por todas as chamadas em *handoff* que solicitam admissão. Os recursos da seção de *handoff*, mesmo considerando os recursos liberados nessas preempções são insuficientes para a admissão de todas as conexões non-GBR em *handoff*, o que justifica o alto número de conexões perdidas.

Conforme mostra a Figura 5.8, o algoritmo de CAC proposto obteve um resultado inferior aos demais algoritmos (à exceção do algoritmo *Basic CAC*) porque prioriza a admissão de chamadas GBR ao transferir recursos da seção non-GBR para as seções de *handoff* e GBR à medida que admite esses tipos de chamada. Consequentemente, a seção non-GBR, com menos recursos, terá condições de admitir um número mais

restrito de chamadas non-GBR. No entanto, é importante destacar que o algoritmo de CAC proposto foi o único entre os demais algoritmos de CAC que não apresentou nenhuma perda de chamada non-GBR em *handoff*. Isso demonstra que o mecanismo de preempção de chamadas non-GBR foi capaz de suprir a demanda de praticamente todas as chamadas em *handoff* que solicitaram admissão, corroborando o propósito inicial de desenvolver uma estratégia de gerenciamento de recursos capaz de minimizar a perda de chamadas em *handoff* de qualquer tipo.

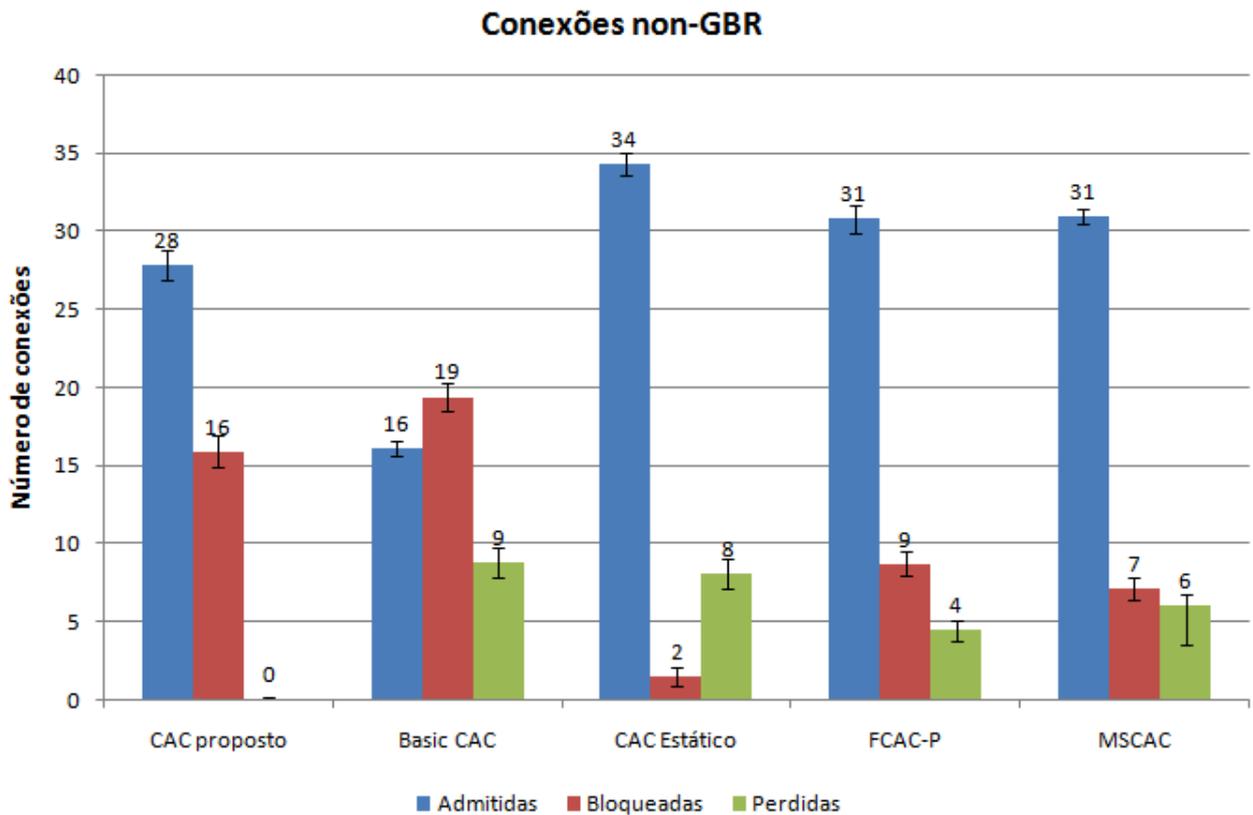


Figura 5.8: Conexões non-GBR admitidas x bloqueadas x perdidas

O algoritmo Basic CAC teve um número de bloqueios maior que o número de admissões por conta da grande exigência de recursos das chamadas non-GBR que solicitam admissão e o fato de ele não ter um mecanismo de preempção. Assim, os recursos da eNodeB são rapidamente consumidos pelas chamadas admitidas. A admissão de chamadas non-GBR nesse caso prejudica o desempenho do algoritmo para a admissão de todas as outras chamadas, já que indisponibiliza rapidamente uma boa parte de seus recursos.

Os algoritmos FCAC-P e MSCAC obtiveram resultados semelhantes e levemente melhores que o algoritmo de CAC proposto em termos de número de admissões de chamadas non-GBR, embora ambos tenham apresentado um número relativamente grande de perdas de chamadas em *handoff*.

O desempenho do algoritmo MSCAC está relacionado à seção exclusiva para chamadas non-GBR. Assim, as chamadas non-GBR que solicitam admissão não são influenciadas pela solicitação de chamadas de outros tipos, aumentando a probabilidade de serem admitidas. No entanto, a medida que as chamadas non-GBR vão sendo admitidas, os recursos de sua seção se tornam mais escassos até um momento a partir do qual todas as chamadas que solicitem admissão são bloqueadas ou perdidas.

Já o desempenho do algoritmo FCAC-P está relacionado à sua própria estratégia de gerenciamento de recursos: a admissão de uma chamada non-GBR está relacionada à ocupação total da banda, na qual a partir de um limiar (50% de ocupação total da banda) existe uma probabilidade de rejeição da chamada de 20%, independente se é uma nova chamada ou uma chamada em *handoff*.

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo, avaliou-se o desempenho do algoritmo de CAC proposto a partir de modelagem e simulação computacional. Foram descritos os principais recursos da ferramenta de simulação utilizada para representar o ambiente de rede proposto que justificaram a sua escolha. Em seguida, foi apresentado o ambiente de simulação utilizado em todas as simulações, juntamente com os detalhes de tráfego e parâmetros computacionais utilizados, que representa um cenário de rede comumente encontrado no mundo real. Foram apresentados os outros algoritmos de CAC utilizados para comparação dos resultados obtidos.

Na sequência, foram exibidos e analisados os resultados quantitativos acerca do algoritmo de CAC proposto, a fim de avaliar seu desempenho. A avaliação de desempenho se deu a partir da comparação desses resultados com os resultados de outros algoritmos de CAC bastante presentes na literatura. Utilizou-se também, para comparação, o modelo de algoritmo de CAC mais elementar, a fim de enaltecer as

vantagens e ganhos computacionais obtidos a partir de estratégias que gerenciem de forma inteligente os limitados recursos da eNodeB. O algoritmo de CAC proposto também foi comparado com a sua versão estática, com o objetivo de destacar a relevância das seções dinâmicas relacionadas aos diversos tipos de conexão.

Os resultados obtidos nas simulações foram analisados levando em consideração a perda de chamadas em *handoff*, o bloqueio de novas conexões, o número total de conexões admitidas e número total de conexões admitidas por tipo de conexão, que são parâmetros importantes e comumente utilizados para avaliação de desempenho de algoritmos de CAC.

Por fim, foram feitas as devidas considerações em torno de cada um dos parâmetros, evidenciando os pontos fortes e fracos do algoritmo de CAC proposto.

Capítulo 6

Conclusões Gerais

As redes móveis celulares atuais têm a necessidade de garantir a qualidade de serviço (QoS) para os diferentes tipos de tráfego de dados de um ambiente móvel.

Uma vez que os recursos de rede são finitos, um algoritmo de CAC precisa decidir quais conexões serão admitidas, de forma a garantir que os requisitos de QoS dessas conexões sejam alcançados e mantidos durante toda a sessão de comunicação do cliente. Consequentemente, algumas conexões serão rejeitadas.

Como é do interesse das operadoras de redes móveis celulares atender o maior número de clientes de maneira eficaz com os recursos de rede disponibilizados, um dos desafios do desenvolvimento de um algoritmo de CAC é alcançar um resultado ótimo que não seja nem conservador demais (reservando mais recursos do que o necessário para conter os requisitos de QoS das conexões já admitidas), nem liberal demais (admitindo conexões que não terão seus requisitos de QoS suportados pelos recursos de rede).

Além deste notável desafio, o algoritmo de CAC de redes celulares precisa lidar com outros fatores intrínsecos às circunstâncias de uma conexão sem fio. O meio físico por onde propagam as ondas de rádio pode sofrer alterações ocasionadas por mudanças climáticas ou por obstáculos existentes no ambiente. Além disso, as redes LTE proporcionam aos seus usuários mobilidade de até 350 km/h. Estes fatores impactam a Eficiência Espectral do canal de rádio, de forma que a quantidade de recursos de rede calculados pelo algoritmo de CAC como sendo a necessária para a garantia de QoS de uma conexão já admitida pode variar. Para que seja capaz de realizar eficientemente a tomada de decisão de admissão de uma conexão, o algoritmo de CAC precisa regularmente calcular as demandas de recursos de rede de cada uma das conexões já admitidas, a fim de assegurar que os recursos disponíveis estejam devidamente atualizados.

Um algoritmo de CAC também precisa lidar com novas conexões e chamadas em *handoff*. Enquanto uma nova conexão se refere a conexões solicitando admissão para

serem iniciadas, uma chamada em *handoff* já está em andamento. O algoritmo de CAC precisa levar em consideração a qualidade de experiência do usuário, geralmente priorizando chamadas em *handoff*, já que a descontinuidade de uma conexão em andamento é mais frustrante do que a não-realização de uma nova conexão.

Diante de todos esses desafios, foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica para compreender de maneira funcional e abrangente as redes LTE, com o objetivo de propor um algoritmo de CAC que priorizasse chamadas em *handoff* independente do seu tipo, garantisse os requisitos de QoS às conexões que fossem admitidas e que tivesse um aproveitamento maior dos recursos da eNodeB resultando em um maior número de admissões.

O algoritmo de CAC proposto subdivide os recursos de rádio da eNodeB considerando o tipo de conexão: primeiramente, ele considera novas conexões e chamadas em *handoff*. A seção de novas conexões, por sua vez, é subdividida em outras duas subseções: GBR e non-GBR.

O algoritmo de CAC proposto também é capaz de alterar a extensão dessas seções, transferindo recursos de rádio não utilizados de uma seção para a outra, de acordo com a demanda de conexões. Dessa forma, mesmo que a seção de *handoff* esteja prestes a se sobrecarregar, é possível que novos recursos sejam disponibilizados e, assim, mais chamadas em *handoff* possam ser admitidas.

Por conta da divisão de recursos de rádio entre os tipos de conexão e a alteração na extensão das respectivas seções, é possível elaborar critérios diferenciados com o objetivo de priorizar chamadas em *handoff* e, na sequência conexões GBR.

Além do repasse de recursos não utilizados de uma seção para a outra, o algoritmo de CAC proposto foi projetado para transferir recursos já reservados de conexões non-GBR até um certo valor, já que aplicações non-GBR possuem requisitos de QoS mais flexíveis e podem operar de forma satisfatória mesmo com menos recursos. Dessa forma, mais recursos de rádio se tornam disponíveis, possibilitando a admissão de mais conexões.

O algoritmo de CAC proposto foi modelado utilizando o simulador LTE-Sim [59], no qual foram implementadas todas as funcionalidades propostas, já que o simulador não oferece nenhuma estrutura para admissão de conexões. Também foram implementadas

outras funções para registro e apresentação dos resultados alcançados, como foi visto no Capítulo 5. Outros algoritmos de CAC conhecidos na literatura e bastante populares também foram modelados e submetidos ao mesmo ambiente de simulação para posterior comparação de resultados.

Os resultados apresentados permitem concluir que o algoritmo de CAC proposto alcançou seu objetivo inicial, sendo capaz de admitir praticamente todas as chamadas em *handoff*, ter um desempenho razoável em relação à admissão de conexões GBR e também de admitir mais conexões do que os seus concorrentes. No entanto, o algoritmo de CAC acabou apresentando um desempenho abaixo dos concorrentes no que se refere às admissões de conexões non-GBR, já que os recursos de rádio são limitados.

Visando a continuidade deste trabalho, sugere-se a combinação do algoritmo proposto com alguma estratégia de escalonamento que garanta um melhor controle dos recursos de rede, a fim de disponibilizar mais recursos para admissão de conexões.

Referências Bibliográficas

1. SIDDEG, H. M., "*Call Admission Control for LTE Networks by Using Bandwidth Reservation Algorithm*", Master's Thesis, Sudan University of Science & Technology, 2015.
2. RUMNEY, M., "*LTE and the Evolution to 4G Wireless*", 2º. ed., John Wiley & Sons, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118799475>
3. NIYATO, D., "*Call Admission Control, Bandwidth Adaptation, and Scheduling in Cellular Wireless Internet: Analytical Models and Performance Evaluation*", University of Manitoba, 2005.
4. DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKÖLD, J., "*4G: LTE/LTE - Advanced for Mobile Broadband*", 1º. ed., Academic Press, 2011. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385489-6.00001-1>
5. LAWAL, M. A.; SAIDU, I.; ABDULLAHI, Y. S., "*Call Admission Control Schemes in LTE Networks: A Survey*", IJCSN International Journal of Computer Science and Network, v. 6, n. 4, p. 523-532, Agosto 2017.
6. 3GPP, "*Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)*", TR 25.912, 2009.
7. 3GPP, "*Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)*", TR 25.913, 2009.
8. COX, C., "*An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications*", Wiley, 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118818046>
9. QUALCOMM INCORPORATED, "*Circuit-switched fallback. The first phase of voice evolution for mobile LTE devices*", Ericsson, 2013.
10. STEPANIUK, O., "*Voice over LTE via Generic Access (VoLGA) as a possible solution of mobile networks transformation*", TCSET 2010, 2010.
11. GSM ASSOCIATION, "*VoLTE Service Description and Implementation Guidelines*", 2014.
12. OBAIDAT, M. S.; NICOPOLITIDIS, P.; ZARAI, F., "*Modeling and Simulation of Computer Networks and Systems Methodologies and Applications*", 1º. ed., Elsevier, 2015.

13. BEDÜRFTIG, G. et al, "*LTE Backhaul - Planning and Optimization*", 1º. ed., Wiley, 2016. <https://doi.org/10.1002/9781118924655.ch2>
14. 3GPP, "*Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)*", TS36.300, 2010.
15. 3GPP, "*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Architecture description*", TR36.401, 2010.
16. TOSKALA A.; HOLMA H.; PAJUKOSKI K.; TIROLA E., "*UTRAN Long Term Evolution in 3GPP*", IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2006.254107>
17. 3GPP, "*User Equipment (UE) requirements for shared spectrum channel access*", TS37.106, 2018. Overall description.
18. HOLMA, H.; TOSKALA, A., "*LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*", John Wiley & Sons, 2009. <https://doi.org/10.1002/9780470745489>
19. CABLEFREE, "*LTE UE (User Equipment) Category & Class Definitions*", CableFree, 2019. Disponível em:
<<https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-ue-category-class-definitions/>>. Acesso em: 12 de Agosto de 2019.
20. SESIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M., "*LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Thoery to Practice*", John Wiley & Sons, 2011.
<https://doi.org/10.1002/9780470978504>
21. KHAN, F., "*LTE for 4G mobile Broadband*", New York: Cambridge University Press, 2009. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810336>
22. MEDEIROS, J. C. O., "*Princípios de Telecomunicações: teoria e prática*", 2º. ed., São Paulo, Érica, 2007.
23. BEC TECHNOLOGIES. "*Quality of Service (QoS) in LTE*", BEC Technologies, p. 1, Agosto 2015. Disponível em:
<<https://bectechnologies.net/wordpress/wpcontent/uploads/2015/08/QoS.pdf>>. Acesso em: 23 de Agosto de 2019.
24. ALTMAN, E., "*Capacity of Multi - service CDMA Cellular Networks with Best - Effort Applications*", Mobicom, Atlanta, Georgia, 2002.
<https://doi.org/10.1145/570645.570671>

25. ANA, M. et al., "*QoS-Aware Single Cell Admission Control for UTRAN LTE Uplink*", VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference, 2008.
<https://doi.org/10.1109/VETECS.2008.548>
26. FALOWO, O.; CHAN, H. A., "*Radio Resource Management in Heterogeneous Cellular Networks*", Department of Electrical Engineering, University of Cape Town South Africa, 2011.
27. EKSTRÖM, H., "*QoS Control in the 3GPP Evolved Packet System*", IEEE Communications Magazine, v. 47, n. 2, p. 76-83, 2009.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4785383>
28. QIAN M.; HUANG Y.; SHI J.; YUAN Y.; TIAN L.; DUTKEWICZ E., "*A Novel Radio Admission Control Scheme for Multiclass Services in LTE Systems*", GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference, 2009.
<https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2009.5426190>
29. SALAH, M., "*Comparative Performance Study of LTE Uplink Schedulers*", Master's thesis, Queen's University, Ontario - Canada, 2011.
30. 3GPP, "*Technical Specification Group Services and System Aspects*", TS 23.203 V8.9.0 , 2010.
31. KWAN, R.; ARNOTT, R.; KUBOTA, M., "*On Radio Admission Control for LTE System*", 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference - Fall, Ottawa, 2010.
<https://doi.org/10.1109/VETECEF.2010.5594566>
32. LEI, H. et al., "*Adaptive Connection Admission Control Algorithm for LTE Systems*", IEEE VTC, p. 2336-2340, 2008.
<https://doi.org/10.1109/VETECS.2008.518>
33. ANAS M.; ROSA C.; CALABRESE F.; PEDERSEN K.; MOGENSEN P., "*Combined Admission Control and Scheduling for QoS Differentiation in LTE Uplink*", 2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference, 2008.
<https://doi.org/10.1109/VETECEF.2008.319>
34. VIJAYFRANKLIN, J.; KUPPUSAMY, P., "*Hybrid Adaptive Call Admission Control Mechanism for Ensuring QoS in 3GPP: LTE Networks*", International Journal of Computer Applications, n. 42, p. 36-41, 2012.
<https://doi.org/10.5120/5838-8162>
35. THOMAS BONALD, A. P., "*Wireless Downlink Data Channels: User Performance and Cell Dimensioning*", MobiCom '03:the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, New York, NY, pp. 339-352, 2009.

36. ZARAI, F. et al., "Adaptive call admission control in 3GPP LTE networks", INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS, p. 1522-1534, 2014. <https://doi.org/10.1002/dac.2415>
37. SALAH EDDINE ELAYOUBI, CHAHED T.; HEBUTERNE G., "Mobility-aware admission control schemes in the downlink of third generation wireless systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology 2006, vol. 56, no. 1, pp. 245-259, 2007. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.883775>
38. SAS B.; BERNAL-MOR E., SPAEY K.; PLA V.; BLONDIA C.; MARTINEZ-BAUSET J., "An analytical model to study the impact to time-varying cell capacity in LTE networks", WMNC 2011, pp. 1-8, 2011. <https://doi.org/10.1109/WMNC.2011.6097234>
39. HALABIAN H.; RENGARAJU P., "A reservation-based call admission control scheme and system modeling in 4G vehicular networks", URASIP Journal on Wireless Communications and Networking (2015), 2015. <https://doi.org/10.1186/s13638-015-0348-8>
40. OVENGALT C. B. T.; DJOUANI K.; KURIEN A., "A fuzzy approach for call admission control in LTE networks", 5th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2014), pp. 237-244, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.420>
41. MINO G.; BAROLLI L.; DURRESI A.; XHAFA F.; KOYAMA A., "A Fuzzy-Based Call Admission Control Scheme for Wireless Cellular Networks Considering Priority of On-going Connections", 2009 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2009. <https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2009.45>
42. FRANKLIN V.; KUPPUSAMY P., "Bacterial foraging optimization supported utility based call admission control framework for 3GPP LTE Networks", Life Science Journal, pp. 394-400, Janeiro de 2013.
43. LUKA, M. K.; ATAYERO, A.; OSHIN, O., "Call admission control techniques for 3GPP LTE: A survey", 2016 SAI Computing Conference, 2016. <https://doi.org/10.1109/SAI.2016.7556057>
44. BELGHITH, A. et al., "Flexible Call Admission Control with Preemption in LTE Networks", 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), University of Sfax, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7511019>
45. 3GPP. "Way Forward on Power Control of PUSCH", R1-073224 , 2007.

46. RANGO, F. D.; MALFITANO, A.; MARANO, S., "GCAD: A Novel Call Admission Control Algorithm in IEEE 802.16 based Wireless Mesh Networks", JOURNAL OF NETWORKS, University of Calabria, Italy, v. 6, n. 4, 2011. <https://doi.org/10.4304/jnw.6.4.595-606>
47. WANG, J.; QIU, Y., "A New Call Admission Control Strategy for LTE Femtocell Networks", 2nd International Conference on Advances in Computer Science and Engineering, National Mobile Communication Research Lab (NCRL), Southeast University, 2013. <https://doi.org/10.2991/cse.2013.75>
48. MAMMAN, M. et al., "An Adaptive Call Admission Control With Bandwidth Reservation for Downlink LTE Networks". 2017 IEEE, pp. 10986 - 10994, 2017. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2713451>
49. OJESANMI, O., "Adaptive Threshold Based Channel Allocation Scheme for Multimedia Network", International Journal of Computer Science and Network Security, v. 9, n. 1, p. 260-265, 2009.
50. HONG, D.; RAPPAPORT, S. S., "Traffic model and performance analysis for cellular mobile radiotelephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures", IEEE Transaction Vehicular Technology Journal , pp. 77-92, 1986. <https://doi.org/10.1109/T-VT.1986.24076>
51. PATI, H. K., "A distributed adaptive guard channel reservation scheme for cellular networks", International Journal of Communication Systems, pp. 1037-1058, 2007. <https://doi.org/10.1002/dac.857>
52. OYEBISI, T.; OJESANMI, O., "Development of Congestion Control Scheme for wireless mobile networks. Journal of Theoretical and Applied Information Technology", p. 965-972, 2008.
53. VIJAYFRANKLIN, J.; KUPPUSAMY, P. "Efficient Channel State Based Call Admission Control for Non Real Time traffic in LTE (3GPP) Networks", International Journal of Computer Science Issues, Março 2012.
54. NIYATO, D.; HOSSAIN, E.; ALFA, A. S., "Performance analysis and adaptive call admission control in cellular mobile networks with time-varying traffic", IEEE International Conference on Communications (ICC 05), Seul, Coreia do Sul, 2005.
55. KHAIRNAR, V. N.; PATIL, D. S., "QOS Evaluation of Call Admission Control for a 4G Network", International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering 2015, 2015.
56. KHDHIR, R.; MNIF, K.; ALI, B.; KAMMOUN, L., "Allocation algorithm based on CAC scheme for LTE network", International Journal of Computer Science and

- Network Security (IJCSNS), v. 16, p. 140, 2016.
57. 3GPP, "*Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical layer procedures*", TS 36.213, 2007.
 58. MOGENSEN, P. et al., "*LTE Capacity Compared to the Shannon Bound*", IEEE 65th Vehicular Technology Conference, 2007.
<https://doi.org/10.1109/VETECS.2007.260>
 59. PIRO, G. et al., "*Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source Framework*", v. 60, n. 2, p. 498-513, 2011. <https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2091660>
 60. SEKIJIMA, L. R. F.; FONSECA, N. L. S., "*Estudo de simulações realistas em redes de acesso móveis LTE/LTE-A*", Instituto de Computação, UNICAMP, 2018.
 61. KHABAZIAN, M.; KUBBAR, O.; HASSANEIN, H., "*Call admission control with resource reservation for multi-service OFDM networks*", International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), p. 781 - 785, 2012.
<https://doi.org/10.1109/ICCNC.2012.6167530>
 62. GHADERI, M.; BOUTABA, R., "*Call admission control in mobile cellular networks: a comprehensive survey*", Wireless Communications and Mobile Computing, Wiley & Sons, 2006. <https://doi.org/10.1002/wcm.246>
 63. HAYKIN, S.; MOHER, M., "*Introdução aos Sistemas de Comunicação*", 2º. ed., Bookman, 2008.
 64. CHUNG, S.-P.; CHEN, Y.-W., "*Performance Analysis of Call Admission Control in SFR-Based LTE Systems*", IEEE Communications Letters, v. 16, p. 1014 - 1017, Maio 2012. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2012.051512.120206>