

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SANDRO MACHADO RIBEIRO

ALOCAÇÃO DE CANAIS EM UMA REDE DE RÁDIOS COGNITIVOS

GERENCIADA POR BASE DE DADOS PREDITIVA ADAPTATIVA

Porto Alegre - RS, Brasil

2014

SANDRO MACHADO RIBEIRO

**ALOCAÇÃO DE CANAIS EM UMA REDE DE RÁDIOS COGNITIVOS
GERENCIADA POR BASE DE DADOS PREDITIVA ADAPTATIVA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sinais, Sistemas e Tecnologia da Informação.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações.

Orientadora: Maria Cristina Felippetto de Castro

Coorientador: Fernando César Comparsi de Castro

Porto Alegre - RS, Brasil

2014



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALOCÇÃO DE CANAIS EM UMA REDE DE RÁDIOS COGNITIVOS GERENCIADA POR BASE DE DADOS PREDITIVA ADAPTATIVA

CANDIDATO: SANDRO MACHADO RIBEIRO

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

DRA. MARIA CRISTINA F. DE CASTRO - ORIENTADORA

DR. FERNANDO CÉSAR COMPARSI DE CASTRO - CO-ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA

**DR. ARTHUR TÓRGO GÓMEZ - PROGRAMA INTERDISCIPLINAR DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA - UNISINOS**

DR. DARIO F. GUIMARÃES DE AZEVEDO - DO PPGE/FENG - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900
Telefone: (51) 3320.3540 - Fax: (51) 3320.3625
E-mail: engenharia.pg.eletrica@pucrs.br
www.pucrs.br/feng

À Ludimila. Pelo amor, companheirismo e amizade.

Agradecimentos

Agradeço à Ludimila pela parceria indispensável durante esta jornada. Agradeço também ao Fernando e a Cristina por terem acreditado no meu trabalho e pelo apoio durante o processo de desenvolvimento do mesmo. À Ester e Nadinho, responsáveis indiretos por esta conquista, sou grato por minha formação como pessoa.

O presente trabalho foi realizado através de cooperação da PUCRS com a Hewlett-Packard Brasil Ltda. com recursos provenientes da Lei de Informática (Lei nº 8.248, de 1991).

*"A gente sempre deve sair à rua como quem foge de casa,
Como se estivessem abertos diante de nós todos os caminhos do mundo.
Não importa que os compromissos, as obrigações, estejam ali...
Chegamos de muito longe, de alma aberta e o coração cantando!"
(Mario Quintana)*

Resumo

O presente trabalho propõe uma metodologia de gerenciamento de canais numa rede de rádios cognitivos (CRN) que utiliza uma base de dados de canais preditiva e adaptativa. Os dados de predição são gerados por um algoritmo de modelagem de espectro que permite simular a ocupação dos canais em faixas de tecnologia celular. O uso de predição possibilita a identificação de oportunidades nas bandas de interesse, permitindo priorizar a utilização dos canais com maior probabilidade de estarem livres. Dessa forma, este trabalho estende a abrangência da IEEE 802.22, na medida em que propõe o uso de dados de predição, bem como a utilização de faixas de tecnologia celular que são comumente utilizadas em áreas urbanas. O caráter adaptativo do sistema desenvolvido atualiza a lista de canais de forma dinâmica ao longo dos ciclos de alocação. Esta característica possibilita a priorização dos canais com maior sucesso no processo de alocação, uma vez que a lista de canais é atualizada de acordo com os resultados das alocações dos usuários secundários (SUs). A metodologia proposta busca realizar a alocação do SU com o mínimo necessário de operações de detecção de canal. A adaptabilidade da base de dados de canais é o fator que possui maior contribuição na redução das operações de detecção de canal na CRN. A diminuição das operações de detecção de canal reduz a troca de informações entre as funções que compõem o plano cognitivo de uma CRN. Consequentemente, uma redução no tráfego de sinalização da rede é esperada, assim como uma diminuição de atrasos resultantes da busca de canais disponíveis.

Palavras-chave: Acesso oportunístico ao espectro. Alocação de canais. Base de dados. Gerenciamento de espectro. Modelagem de espectro. Redes de rádios cognitivos.

Abstract

This work proposes a channel allocation methodology in a cognitive radio network (CRN) that uses a predictive and adaptive channel database. A spectrum-modeling algorithm, that allows simulating channel occupation in cellular technology bands, generates the prediction data. The use of prediction enables the identification of opportunities in the bands of interest, which allows prioritizing the use of those channels with greater probability of being idle. Thus, this work extends the scope of IEEE 802.22, in that proposes the use of prediction data, as well as the use of cellular technology bands, which are commonly used in urban areas. The adaptive nature of the developed system updates the channel list dynamically over the allocation cycles. This feature enables to prioritize the channels with greater success in the allocation process, since the channel list is updated according to the results of secondary users (SUs) allocation. The proposed methodology aims to allocate the SU with the minimum of channel sensing operations required. The adaptive feature of the channel database gives a major contribution to reducing the channel sensing operations in the CRN. The decrease in channel sensing operations reduces the exchange of information between the functions that comprise the cognitive plane of a CRN. Consequently, a reduction in the network signaling traffic is expected, as well as a reduction of delays resulting from the search of available channels.

Keywords: Cognitive radio networks. Database service. Opportunistic spectrum access. Spectrum management. Spectrum modeling.

Lista de Ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Diagrama básico do sistema proposto..... | 18 |
| Figura 1.2 - Características e objetivos do sistema desenvolvido. | 20 |
| Figura 2.1 - Diagrama em blocos da dinâmica de dados em uma rede de rádios cognitivos..... | 23 |
| Figura 2.2 - Operação no modo <i>underlay access</i> | 27 |
| Figura 2.3 - Operação no modo <i>overlay access</i> | 28 |
| Figura 2.4 - Topologia básica de uma rede de rádios cognitivos..... | 30 |
| Figura 2.5 - Pilha de protocolos de um radio cognitivo. | 31 |
| Figura 3.1 - Cenário utilizando WRAN para atendimento em zona rural. | 35 |
| Figura 3.2 - <i>Spectrum Manager</i> e suas <i>interfaces</i> lógicas. | 37 |
| Figura 3.3 - Arquitetura de acesso ao <i>Database Service</i> (DS). | 40 |
| Figura 3.4 - Entradas e saídas do SSF. | 42 |
| Figura 4.1 - Combinação dos modelos <i>low/high time-resolution</i> para representação de sistemas GSM e DCS..... | 44 |
| Figura 4.2 - Comparação de dados empíricos com dados gerados pelas distribuições Beta e Kumaraswamy. | 47 |
| Figura 4.3 - Dados obtidos através de medição para a faixa TETRA DL. | 56 |
| Figura 4.4 - Dados obtidos através de simulação para a faixa TETRA DL..... | 56 |
| Figura 5.1 - Funções, entradas e saídas dos módulos do sistema proposto..... | 61 |
| Figura 5.2 - Relacionamento entre os módulos do sistema e da IEEE 802.22..... | 63 |
| Figura 5.3 - Fluxograma do ciclo de alocação de canal..... | 64 |
| Figura 5.4 - Dados simulados de ocupação de espectro. | 67 |
| Figura 5.5 - Exemplo de arquivo da faixa DCS 1800 DL. | 74 |
| Figura 5.6 - Exemplo de matriz de lista de canais. | 75 |
| Figura 5.7 - Conteúdo de base de dados de canais. | 77 |
| Figura 5.8 - Exemplo de tabela de usuários..... | 78 |
| Figura 5.9 - Simulação de dados instantâneos na banda GSM 900 DL. | 79 |
| Figura 5.10 - Simulação de detecção do canal..... | 81 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.11 - Exemplo de matriz de tempo. | 82 |
| Figura 5.12 - Implementação da lista de canais de usuário. | 83 |
| Figura 5.13 - Troca de informações entre os módulos do sistema. | 85 |
| Figura 5.14 - Exemplo de matriz de sequência de canais. | 87 |
| Figura 5.15 - Usuário ocupando sequência de canais. | 88 |
| Figura 5.16 - Relacionamento entre os módulos do sistema no modo adaptativo. | 89 |
| Figura 5.17 - Matriz de estatísticas de canal. | 90 |
| Figura 5.18 - Evolução da lista de canais no modo adaptativo. | 91 |
| Figura 5.19 - Relacionamento entre os módulos do sistema no modo adaptativo. | 92 |
| Figura 5.20 - Funções, entradas e saídas dos módulos no modo adaptativo. | 93 |
| Figura 6.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de média escala. | 98 |
| Figura 6.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de média escala. | 102 |
| Figura 6.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de média escala. | 106 |
| Figura 6.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de média escala. | 110 |
| Figura 6.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de média escala. | 114 |
| Figura 6.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de média escala. | 123 |
| Figura 6.7 - Estatísticas de acesso para uma simulação de larga escala e espectro útil de 512 canais. | 133 |
| Figura 6.8 - Estatísticas de acesso para uma larga escala e espectro útil de 950 canais. | 135 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros das distribuições Beta e Kumaraswamy para representação do <i>duty cycle</i> | 48 |
| Tabela 4.2 - Distribuições de probabilidade para modelos <i>high time-resolution</i> | 49 |
| Tabela 4.3 - Valores dos parâmetros da distribuição GP para obtenção do DC. | 50 |
| Tabela 4.4 - Valores típicos do parâmetro p para determinação do tamanho do cluster. | 51 |
| Tabela 4.5 - DC <i>archetypes</i> | 52 |
| Tabela 5.1 - Informações das bandas utilizadas. | 65 |
| Tabela 5.2 - Índice dos canais para cada banda. | 73 |
| Tabela 6.1 - Cenário 1 em situação de média escala. | 97 |
| Tabela 6.2 - Cenário 2 em situação de média escala. | 102 |
| Tabela 6.3 - Cenário 3 em situação de média escala. | 106 |
| Tabela 6.4 - Cenário 4 em situação de média escala. | 110 |
| Tabela 6.5 - Cenário 5 em situação de média escala. | 114 |
| Tabela 6.6 - Resultados dos cenários de 1 a 5 em situação de média escala. | 118 |
| Tabela 6.7 - Simulação para avaliação de detecção de canal. | 119 |
| Tabela 6.8 - Cenário 6 em situação de média escala. | 122 |
| Tabela 6.9 - Resultados das simulações dos cenários 1 e 6. | 129 |
| Tabela 6.10 - Análise do espectro com larga escala e espectro útil de 512 canais. | 131 |
| Tabela 6.11 - Análise do espectro com larga escala e espectro útil de 950 canais. | 134 |
| Tabela 7.1 - Comparação dos indicadores dos cenários de validação. | 139 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | |
|--------|--|
| ADC | <i>Analog to Digital Converters</i> |
| ANATEL | Agência Nacional de Telecomunicações |
| ATSC | <i>Advanced Television Systems Committee</i> |
| BS | <i>Base Station</i> |
| BST | <i>Blind Sensing Techniques</i> |
| CP | <i>Cognitive Plane</i> |
| CPC | <i>Cognitive Pilot Channel</i> |
| CPE | <i>Customer Premisse Equipment</i> |
| CR | <i>Cognitive Radio</i> |
| CRD | <i>Cognitive Radio Device</i> |
| CRN | <i>Cognitive Radio Network</i> |
| CSMA | <i>Carrier Sense Multiple Access</i> |
| DB | Distribuição Beta |
| DC | <i>Duty Cycle</i> |
| DCA | <i>Dynamic Channel Allocation</i> |
| DCS | <i>Digital Cellular System</i> |
| DK | Distribuição Kumaraswamy |
| DL | <i>Downlink</i> |
| DS | <i>Database Service</i> |
| DSA | <i>Dynamic Spectrum Access</i> |
| DT | <i>Discrete-Time</i> |

| | |
|-------|--|
| EDGE | <i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i> |
| FCA | <i>Fixed Channel Allocation</i> |
| FDMA | <i>Frequency Division Multiple Access</i> |
| FFT | <i>Fast Fourier Transform</i> |
| G | Gama |
| GE | <i>Generalized Exponential</i> |
| GL | <i>Geolocation services</i> |
| GP | <i>Generalized Pareto</i> |
| GSM | <i>Global System for Mobile communications</i> |
| HCA | <i>Hybrid Channel Allocation</i> |
| HTR | <i>High Time-Resolution</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| IETF | <i>Internet Engineering Task Force</i> |
| LTR | Low Time-Resolution |
| LTE | <i>Long Term Evolution</i> |
| MAC | <i>Media Access Control</i> |
| MAE | Módulo de Administração do Espectro |
| MAU | Módulo de Alocação de Usuários |
| MCC | Módulo de Classificação de Canais |
| MDE | Módulo de Detecção de Espectro |
| MGE | Módulo de Geração de Espectro |
| NSA | <i>Negotiated Spectrum Access</i> |
| OA | <i>Overlay Access</i> |
| OFDMA | <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> |
| OSA | <i>Opportunistic Spectrum Access</i> |
| P | Pareto |

| | |
|-------|---|
| PHY | <i>Physical Layer</i> |
| PDF | <i>Probability Density Function</i> |
| PU | <i>Primary User</i> |
| QoS | <i>Quality of Service</i> |
| RACH | <i>Random Access Channel</i> |
| RAN | <i>Radio Access Network</i> |
| RF | Radiofrequência |
| SDR | <i>Software-Defined Radio</i> |
| SS | <i>Spectrum Sensing</i> |
| SSA | <i>Spectrum Sensing Automaton</i> |
| SSF | <i>Spectrum Sensing Function</i> |
| SSL | <i>Security Socket Layer</i> |
| SST | <i>Signal Specific Techniques</i> |
| SM | <i>Spectrum Manager</i> |
| SU | <i>Secondary User</i> |
| TDMA | <i>Time Division Multiple Access</i> |
| TETRA | <i>Terrestrial Trunked Radio</i> |
| UA | <i>Underlay Access</i> |
| UHF | <i>Ultra High Frequency</i> |
| UL | <i>Uplink</i> |
| VHF | <i>Very High Frequency</i> |
| W | Weibull |
| WCDMA | <i>Wideband Code Division Multiple Access</i> |
| WLAN | <i>Wireless Local Area Networks</i> |
| WRAN | <i>Wireless Regional Area Network</i> |
| 3GPP | <i>3rd Generation Partnership Project</i> |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 16 |
| 2 | Rádios Cognitivos | 21 |
| 2.1 | <i>Software-Defined Radio</i> | 21 |
| 2.2 | Acesso e Compartilhamento do Espectro | 23 |
| 2.2.1 | Espectro Não-Licenciado | 25 |
| 2.2.2 | Espectro Licenciado | 25 |
| 2.2.3 | Acesso Oportunístico ao Espectro | 25 |
| 2.2.4 | <i>Underlay Access</i> | 26 |
| 2.2.5 | <i>Overlay Access</i> | 27 |
| 2.3 | <i>Spectrum Sensing</i> | 28 |
| 2.4 | Arquitetura da Rede de Rádios Cognitivos | 29 |
| 2.5 | Métodos de Alocação de Canal | 31 |
| 2.5.1 | <i>Fixed Channel Allocation</i> | 31 |
| 2.5.2 | <i>Dynamic Channel Allocation</i> | 32 |
| 2.5.3 | <i>Hybrid Channel Allocation</i> | 32 |
| 3 | IEEE 802.22 | 34 |
| 3.1 | <i>Spectrum Manager</i> | 35 |
| 3.1.1 | Manutenção de Informações de Disponibilidade de Espectro | 37 |
| 3.1.2 | Classificação e Seleção dos Canais | 38 |
| 3.2 | <i>Database Service</i> | 39 |
| 3.3 | <i>Spectrum Sensing Automaton</i> | 40 |
| 4 | Modelagem de Espectro | 43 |
| 4.1 | <i>Duty Cycle</i> | 45 |
| 4.2 | Modelos de Domínio Tempo | 48 |
| 4.3 | Agrupamento de Canais | 50 |
| 4.4 | Procedimento para Simulação de Espectro | 52 |
| 4.4.1 | Geração de Valores de <i>Duty Cycle</i> | 52 |
| 4.4.2 | Atribuição dos Valores de DC aos Canais | 53 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.4.3 | Geração das Sequências de Ocupação no Domínio Tempo | 54 |
| 5 | Sistema Proposto..... | 58 |
| 5.1 | Arquitetura Computacional..... | 61 |
| 5.2 | Modo Preditivo | 65 |
| 5.3 | Construção da Lista de Canais | 73 |
| 5.4 | Alocação de Canais | 76 |
| 5.5 | Detecção do Espectro..... | 78 |
| 5.6 | Lista de Canais | 82 |
| 5.7 | Gerenciamento dos Módulos | 83 |
| 5.8 | Demandas de QoS..... | 85 |
| 5.9 | Modo Adaptativo | 88 |
| 6 | Planejamento dos Experimentos..... | 94 |
| 6.1 | Validação dos Resultados..... | 96 |
| 6.1.1 | Cenário 1: Base de Dados Preditiva Adaptativa | 97 |
| 6.1.2 | Cenário 2: Base de Dados Preditiva | 101 |
| 6.1.3 | Cenário 3: Busca Sequencial | 105 |
| 6.1.4 | Cenário 4: Busca Randômica..... | 109 |
| 6.1.5 | Cenário 5: Base de Dados Adaptativa | 113 |
| 6.1.6 | Análise dos Resultados: Cenários de 1 a 5..... | 117 |
| 6.1.7 | Análise da Detecção de Canal | 118 |
| 6.2 | Experimentos | 120 |
| 6.2.1 | Cenário 6: Usuários de QoS..... | 120 |
| 6.2.2 | Análise de Resultados: Cenário 6 | 129 |
| 6.2.3 | Análise da Alocação do Espectro..... | 131 |
| 6.2.3.1 | Espectro Útil de 512 Canais | 131 |
| 6.2.3.2 | Espectro Útil de 950 Canais | 134 |
| 7 | Conclusão..... | 137 |
| | Referências | 141 |
| | Apêndice A - Código do MGE..... | 145 |
| | Apêndice B - Amostras de Espectro..... | 152 |
| | Apêndice C - Código do MCC..... | 165 |
| | Apêndice D - Código do MAU..... | 173 |
| | Apêndice E - Código do MDE | 184 |
| | Apêndice F - Código do MAE | 187 |

| | |
|---|------------|
| Apêndice G - Análise Pequena Escala | 208 |
| Apêndice H - Análise Larga Escala..... | 237 |
| Apêndice I - Resultados Detecção Canal | 268 |

1 Introdução

Com o avanço das tecnologias e uma demanda de serviços cada vez maior por parte dos usuários, o espectro de frequências se torna um recurso indispensável para o mundo moderno. Por ser um recurso natural, seu uso de forma desordenada pode resultar em saturação, tornando determinadas faixas do espectro impossíveis de serem usadas devido ao alto nível de interferência entre usuários (WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010). A fim de evitar seu colapso, vários aspectos relativos ao espectro eletromagnético precisam ser reavaliados. Novas tecnologias, métodos de acesso e regulamentação deste recurso são pontos fundamentais e que precisam ser discutidos por pesquisadores e órgãos governamentais.

Na última década o estudo de rádios cognitivos ou *cognitive radios* (CR) tem mostrado resultados consistentes em trabalhos que visam utilizar oportunidades no espectro de frequências para uso de comunicações. Estas oportunidades podem ser desde pequenas faixas de frequência não utilizadas, até bandas inteiras. Em alguns casos estes recursos podem estar disponíveis em horários específicos, devido à não utilização pelo detentor dos direitos de exploração. Uma rede de rádios cognitivos (CRN, do inglês *cognitive radio network*), e seus dispositivos de acesso (CRD, do inglês *cognitive radio device*), devem possuir inteligência computacional suficiente para identificar as necessidades do usuário e prover os recursos necessários para atender estas necessidades (MITOLA, 2000).

Dentro da área de rádios cognitivos, o estudo do acesso dinâmico ao espectro (DSA, do inglês *dynamic spectrum access*) possui grande importância para este trabalho. O objetivo principal do DSA é permitir que usuários secundários (SU, do inglês *secondary users*), utilizem faixas disponíveis no espectro de frequências de forma oportunista e sem causar interferência nos usuários primários (PU, do inglês *primary users*). Os PUs são usuários licenciados e com direito de uso exclusivo em determinadas faixas do espectro. Como exemplo deste tipo de usuário, pode-se citar clientes de operadoras celular e emissoras de TV (VENKATARAMAN, 2012).

Pensando na próxima geração de redes sem fio e numa utilização otimizada do espectro, em julho de 2011 o padrão IEEE 802.22 foi publicado para

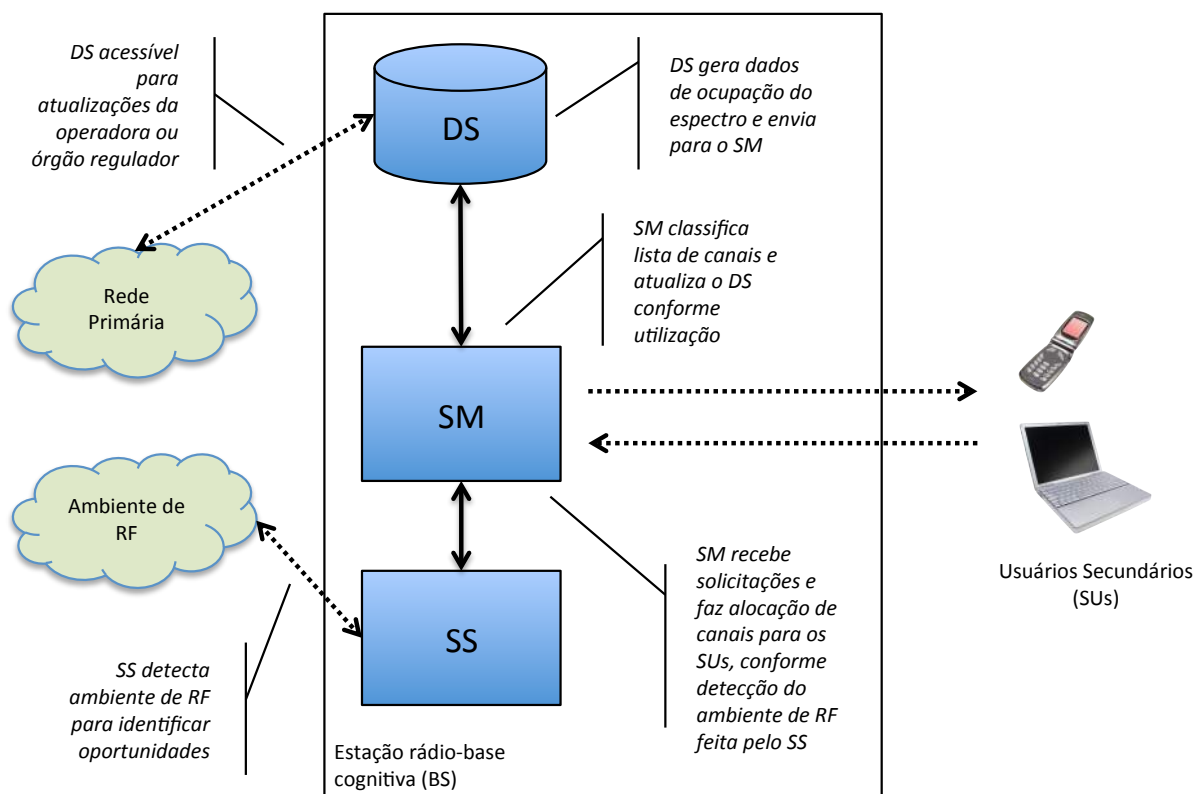
regulamentar as redes WRAN (*Wireless Regional Area Network*). Essas redes exploram espaços não utilizados no espectro de frequências de televisão, especificamente nas faixas VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*). A IEEE 802.22 WRAN foi criada com o intuito de permitir a interoperabilidade de produtos de tecnologia sem fio em regiões de baixa densidade populacional, através do uso de técnicas de rádios cognitivos (IEEE 802.22, 2011).

Um recurso importante para o estudo de DSA/CR são modelos que representem com fidelidade a ocupação real do espectro. Implementados e testados com base em dados de medições, estes modelos são ferramentas de grande importância para simulação em ambientes computacionais. O algoritmo implementado nas simulações deste trabalho (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL; LÓPEZ-PÉREZ; VASILAKOS, 2011), apresenta um modelo que reproduz com precisão propriedades do domínio tempo e frequência das bandas dos serviços *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA), *Global System for Mobile communications* (GSM) e *Digital Cellular System* (DCS). Com ele é possível simular dados de utilização que representam de forma consistente as propriedades estatísticas de ocupação do espectro. Assim, este algoritmo constitui ferramenta importante neste trabalho.

Conforme definido no IEEE 802.22, o gerenciamento do espectro no plano cognitivo da CRN é realizado pelo *Spectrum Manager* (SM). O SM fica localizado na estação rádio-base (BS, do inglês *base station*), e possui atribuições extremamente importantes. Dentre elas pode-se destacar o armazenamento de informações de disponibilidade do espectro, seleção e gerenciamento de canais, agendamento da operação de *spectrum sensing* (SS) e acesso ao serviço de base de dados (DS, do inglês *Database Service*) (IEEE 802.22, 2011).

Na IEEE 802.22 o módulo de *Spectrum Sensing* (SS) possui uma relação operacional bem próxima com o SM. As informações de sucesso e falha na alocação dos canais são repassadas pelo SS ao SM através de interações diretas entre os dois blocos. A reserva dos canais e a busca por novos, em caso de falha na alocação, são repassadas pelo SM ao SS, caracterizando uma comunicação constante entre as duas instâncias (IEEE 802.22, 2011). A Figura 1.1 mostra um diagrama básico do sistema proposto, bem como as principais interações entre cada função da rede cognitiva.

Figura 1.1 - Diagrama básico do sistema proposto.



Fonte: O autor.

Assim sendo, o presente trabalho propõe uma metodologia de gerenciamento de canais numa CRN, que utiliza uma base de dados de canais preditiva e adaptativa.

O uso de predição permite priorizar no processo de alocação, a utilização dos canais com maior probabilidade de estarem livres. Os dados de predição são gerados através de um algoritmo de modelagem de espectro (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL; LÓPEZ-PÉREZ; VASILAKOS, 2011), que permite simular a ocupação dos canais nas faixas TETRA, GSM 900 e DCS 1800, possibilitando a identificação de oportunidades ou *white spaces* (WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010) nestas faixas. Dessa forma, este trabalho estende a abrangência da IEEE 802.22, na medida em que propõe o uso de dados de predição, bem como o acesso a faixas de tecnologia celular, que são mais comumente utilizadas em áreas urbanas.

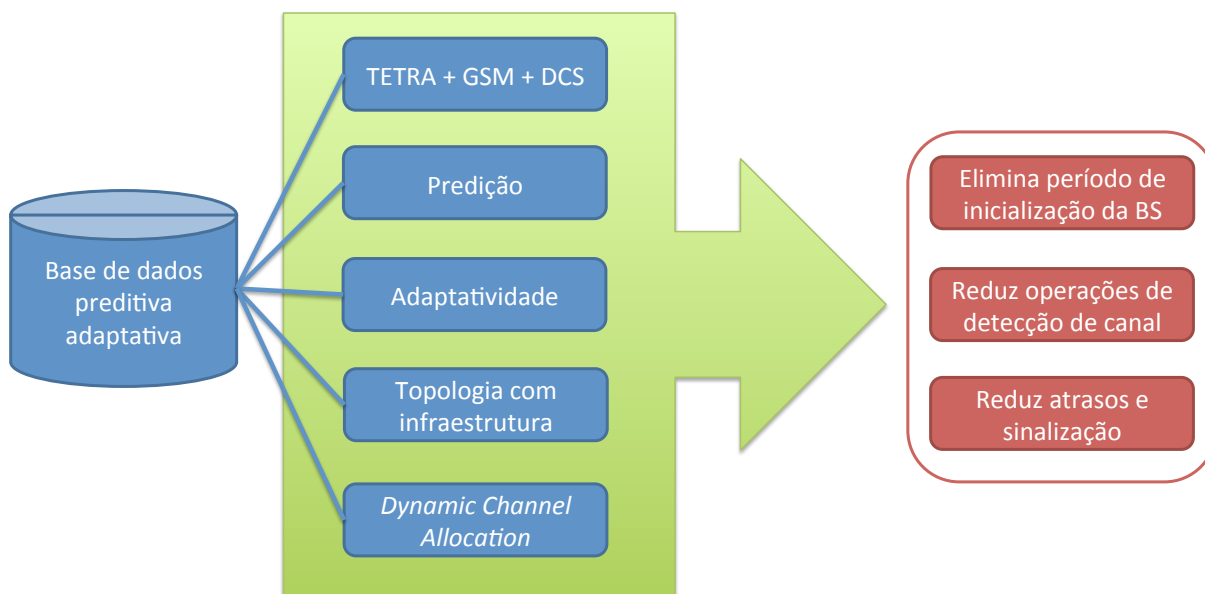
O caráter adaptativo do sistema desenvolvido atualiza a lista de canais de forma dinâmica ao longo do processo de alocação. A adaptabilidade da base de dados de canais é o fator que possui maior contribuição na diminuição de falhas de

detecção de canal na alocação de SUs. Esta característica possibilita a priorização dos canais com maior sucesso no processo de alocação, de acordo com os resultados das alocações. Esta funcionalidade também possibilita que o sistema opere sem a presença de uma base de dados de canais na inicialização. Dessa forma, na ausência de dados de predição ou de uma lista de canais disponíveis, o SM/BS é capaz de construir a base de dados de canais de forma autônoma, com base somente nos resultados das alocações. Esta situação é considerada na IEEE 802.22, uma vez que o DS é definido como um serviço opcional e, de acordo com definição de órgãos regulatórios, poderá não existir. Nesse caso, segundo a IEEE 802.22, seria responsabilidade do SM/BS a identificação dos melhores canais para alocação de SUs. Assim, quando não houver um DS disponível, o modo adaptativo pode ser utilizado para construção da base de dados de canais.

Através da metodologia proposta, busca-se a maior assertividade possível na alocação de SUs na CRN. Isto é obtido minimizando as falhas de detecção de canal através do uso de dados de predição e a adaptabilidade da base de dados de canais. Com a redução nas falhas de detecção de canal, espera-se uma redução na troca de informações entre as funções que compõem o plano cognitivo de uma CRN. Conseqüentemente, uma redução do tráfego de sinalização da rede é esperado, assim como uma diminuição de atrasos resultantes da busca de canais disponíveis para alocação de SUs. Dessa forma, ao reduzir as falhas de detecção de canal, a utilização da metodologia proposta melhora o desempenho global da rede.

A Figura 1.2 mostra um resumo das características que definem o sistema proposto, bem como seus objetivos. O uso de predição e adaptabilidade da base de dados de canais são as principais características. Além destas, "TETRA + GSM 900 + DCS 1800" representa as faixas do espectro de interesse. A topologia com infraestrutura indica a presença de uma *Base Station*, que é responsável pelo gerenciamento da CRN. O uso de *Dynamic Channel Allocation* indica a forma como os canais serão gerenciados pelo *Spectrum Manager*. Este esquema de alocação de canais será melhor detalhado na Seção 2.5. Os objetivos aparecem no quadro vermelho à direita.

Figura 1.2 - Características e objetivos do sistema desenvolvido.



Fonte: o autor.

Adicionalmente, para aqueles serviços que demandam largura de banda maior do que 200 kHz, o método proposto permite reservar sequências de canais disponíveis no espectro. Desse modo, torna-se possível atender as necessidades de *Quality of Service* (QoS) de usuários com esse tipo de demanda.

O presente trabalho está organizado em sete capítulos. Os capítulos de 2 a 4 fazem parte da revisão bibliográfica, apresentando conceitos fundamentais de Rádios Cognitivos, IEEE 802.22 e Modelagem de Espectro, respectivamente. O Capítulo 5 detalha o sistema proposto e o Capítulo 6 apresenta o planejamento, validação e resultados dos experimentos. A conclusão no Capítulo 7 apresenta um resumo comparativo dos resultados obtidos no Capítulo 6.

2 Rádios Cognitivos

O conceito de rádios cognitivos prevê a utilização de rádios inteligentes concebidos para controlar redes sem fio extremamente complexas, com tecnologias e demandas de serviços das mais variadas. Haykin (2005) define o termo *cognitive radio* (CR) como um rádio capaz de estar ciente de seus arredores, aprendendo e mudando de forma adaptativa seus parâmetros de operação em tempo real, com o objetivo de prover, a qualquer momento e em qualquer lugar, uma comunicação espectralmente eficiente. Assim, a tecnologia de CR e seus dispositivos inteligentes podem ser a solução para utilização do espectro de forma mais eficiente e atender a demanda crescente de qualidade nas redes *wireless*.

A próxima geração de redes sem fio é caracterizada pela heterogeneidade e uso de rádios cognitivos. Características como altas taxas de transmissão e suporte a *Quality of Service* (QoS) estão entre as mais importantes para atendimento de serviços de voz, vídeo e dados. Além disso, a convergência para uma tecnologia de acesso única surge como uma tendência natural. Numa rede convergente espera-se que um dispositivo com múltiplas interfaces seja capaz de se conectar em redes de tecnologias diferentes simultaneamente e de forma transparente para o usuário (HOSSAIN; NIYATO; HAN, 2009).

Neste trabalho, alguns conceitos fundamentais de rádios cognitivos (CR) são aplicados para exploração de oportunidades em bandas licenciadas do espectro. Especialmente no que diz respeito a existência de um elemento central responsável pelo gerenciamento do espectro e dos usuários. Desse modo, módulos que desempenham tais funções são implementadas, de forma que simulem parte de uma rede de rádios cognitivos (CRN).

2.1 *Software-Defined Radio*

O termo SDR (*software-defined radio*) está fortemente associado às redes de rádios cognitivos (CRN) e pode ser definido como uma plataforma onde as principais funcionalidades do rádio são controladas ou implementadas em *software*

(WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010). O SDR é definido como sendo o *core* tecnológico que serve como base para toda a rede cognitiva. Nela, o rádio cognitivo seria um SDR com conhecimento do ambiente onde está inserido. De forma autônoma ele ajusta seus parâmetros de operação para atendimento das demandas da CRN (ARSLAN, 2007).

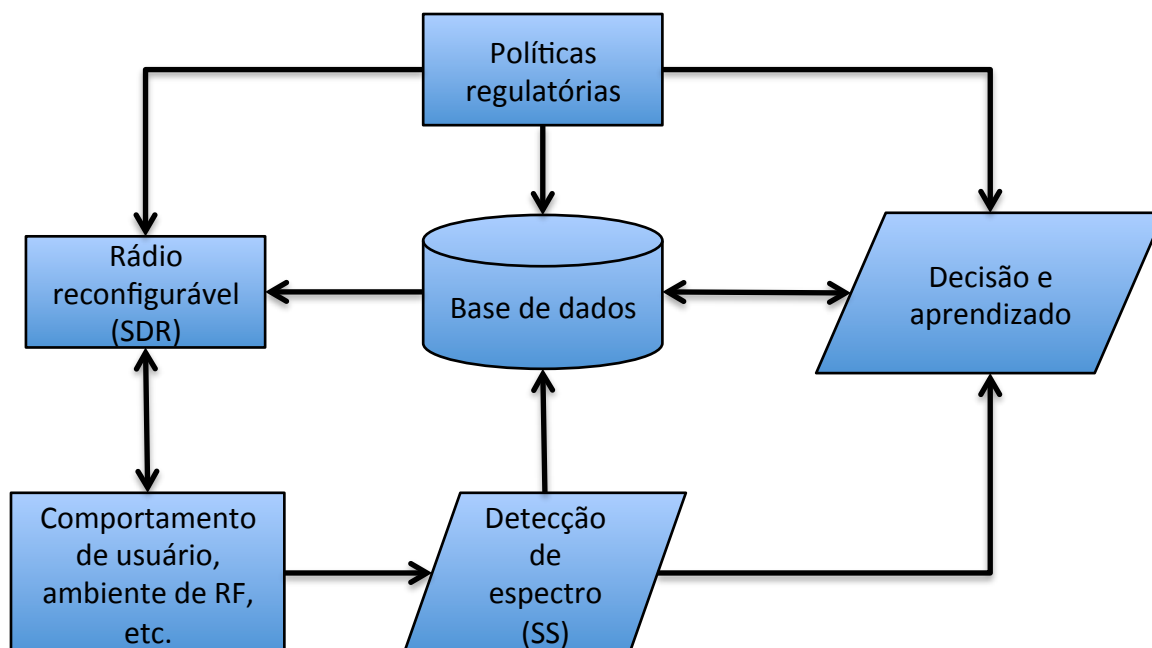
Por ser facilmente reconfigurável, o SDR é extremamente adaptativo, o que o torna um elemento chave para uma CRN. Num SDR propriedades como frequência da portadora, largura de banda e tipo de modulação são definidos inteiramente por *software* (FETTE, 2006). Isto possibilita que um dispositivo possa operar em diversas faixas do espectro, independentemente da tecnologia associada a essas bandas.

Observando o espectro de frequências, especialmente nas bandas licenciadas, nota-se que, enquanto algumas faixas apresentam alta utilização, outras possuem certa ociosidade (MCHENRY; MCCLOSKEY; LANE-ROBERTS, 2005). O conceito de *cognitive radio* suportado pelo SDR, permite que estas porções pouco utilizadas possam ser alocadas a usuários não-licenciados de forma dinâmica e sem causar interferência nos usuários primários. Essas oportunidades no espectro licenciado são conhecidas também como *white spaces* ou *spectrum holes*.

Devido à complexidade das tarefas atribuídas ao SDR, o custo computacional adicionado aos dispositivos dos usuários da CRN (CPEs, do inglês *Customer Premise Equipment*) é bastante grande. Por conta disso, o consumo de energia dos CPEs torna-se uma questão latente numa CRN. Assim, a adoção de uma topologia centralizada se apresenta como uma abordagem mais apropriada, pois funções com maior complexidade, como gerenciamento do espectro e de usuários, são de responsabilidade do elemento de controle central da rede, a *base station* (BS).

A Figura 2.1 mostra os principais blocos e a dinâmica dos dados de uma rede de rádios cognitivos. Informações como comportamento do usuário, políticas de uso e detecção do ambiente de radiofrequência são utilizadas para reconfigurar o rádio conforme a necessidade do usuário e da rede (WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010).

Figura 2.1 - Diagrama em blocos da dinâmica de dados em uma rede de rádios cognitivos.



Fonte: adaptado de Wyglinski, Nekovee, Hou (2010).

Na Figura 2.1, as políticas regulatórias delimitam a utilização do espectro, fornecendo informações como canais permitidos, canais proibidos e bandas de operação. Estas informações são utilizadas para atualização da base de dados de canais e configuração dos parâmetros de operação do SDR, além de servir como referência para o módulo de decisão e aprendizado. As alterações no comportamento do usuário e ambiente de RF são perceptíveis ao SDR e ao módulo de detecção de espectro. Este último, é responsável por repassar essas informações para a base de dados de canais e para o módulo de decisão e aprendizado do CR.

2.2 Acesso e Compartilhamento do Espectro

A interferência em ondas de rádio ocorre quando múltiplas fontes tentam transmitir simultaneamente na mesma frequência (HOSSAIN; NIYATO; HAN, 2009). No compartilhamento do espectro de uma CRN o *Spectrum Manager* (SM) é responsável por gerenciar a disponibilidade de canais e usuários de forma a evitar que esse tipo de situação ocorra.

No ambiente de rádios cognitivos, o *Dynamic Spectrum Access* (DSA) pode ser classificado em três modelos básicos: de uso exclusivo, uso compartilhado e modelos comuns. No modelo de uso exclusivo o usuário primário (PU) controla e

concede acesso ao usuário secundário (SU) a faixas do espectro licenciado. No modo compartilhado o SU acessa o espectro licenciado de forma oportunista, utilizando faixas não ocupadas da banda e sem causar interferência nos PUs. Nos modelos comuns o SU acessa o espectro livremente (HOSSAIN; NIYATO; HAN, 2009).

O compartilhamento do espectro é definido como o uso de uma banda de frequências de rádio em determinada área geográfica por um certo número de entidades independentes. Numa CRN, o acesso dessas entidades ao espectro ocorre através de mecanismos diferentes de técnicas mais tradicionais como o *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) ou *Random Access Channel* (RACH), por exemplo (WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010).

Um cenário onde múltiplos usuários com demandas de serviços das mais variadas acessam o espectro simultaneamente é relativamente comum. Para garantir a qualidade dos serviços, alguns mecanismos devem ser implementados de forma que o compartilhamento e utilização do espectro sejam realizados de forma otimizada.

O compartilhamento do espectro pode ocorrer no modo temporal, como em sistemas *push-to-talk* e redes WLAN IEEE 802.11. O compartilhamento no domínio frequência é utilizado em sistemas *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), usado na primeira geração de telefonia móvel, e o *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), utilizado em rádio e televisão digital. Outro bom exemplo de compartilhamento é o reuso de frequências em redes de telefonia celular, onde um canal utilizado numa determinada região pode ser utilizado novamente em regiões mais distantes do primeiro ponto (WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010).

Várias tecnologias de acesso (RAT, do inglês *Radio Access Technology*) ou operadoras utilizando uma mesma banda, caracterizam um compartilhamento horizontal do espectro (WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010). Já o compartilhamento vertical ocorre quando temos uma rede primária onde usuários primários convivem com usuários secundários, mas possuem prioridade em relação a estes na utilização dos recursos da rede.

Com base no direito de uso, o espectro de frequências pode ser dividido em dois grandes grupos: as bandas licenciadas e as não-licenciadas.

2.2.1 Espectro Não-Licenciado

Estas faixas são designadas para dispositivos que usualmente operam na banda de 2.4 GHz e que não estão sujeitos a regras regulatórias rigorosas, nem tampouco usam métodos de acesso complexos. Em função disso, são mais propensos à interferência. Os exemplos mais comuns são dispositivos *bluetooth*, redes WLAN (*Wireless Local Area Network*) que utilizam o padrão IEEE 802.11, além dos fornos de micro-ondas (WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010).

Em função da grande quantidade de dispositivos operando na banda não-licenciada e das políticas de controle de interferência não serem rigorosas, a tendência de saturação desta faixa é bastante grande. Em contrapartida, estudos mostram que existem faixas consideráveis de bandas licenciadas que poderiam ser utilizadas através de técnicas de DSA (3GPP, 2006). A premissa básica para utilização dessas bandas seria não permitir que o usuário secundário causasse qualquer tipo de interferência no usuário licenciado.

2.2.2 Espectro Licenciado

A banda licenciada é de uso exclusivo do detentor dos direitos de utilização da mesma. Numa rede licenciada de uma operadora celular, por exemplo, todos os usuários compartilham a mesma banda, através da utilização de recursos específicos e exclusivos para cada usuário. Esses recursos podem ser *time-slots*, códigos, subcanais ou uma combinação deles.

Normalmente, o detentor adquire o direito de utilização, através de leilões realizados pelos órgãos regulatórios. Essas entidades governamentais são as responsáveis pelo gerenciamento das bandas de frequência em cada país. Na maior parte das vezes, o órgão regulatório também estipula qual tecnologia será utilizada, como por exemplo, LTE ou WCDMA (FETTE, 2006).

2.2.3 Acesso Oportunístico ao Espectro

Com relação à forma de acesso, o uso dos *white spaces* pode ocorrer nos modos *Negotiated Spectrum Access* (NSA) ou *Opportunistic Spectrum Access* (OSA).

No modo NSA, há a necessidade de um meio de acesso pelo qual usuários licenciados e não-licenciados possam se comunicar. Através deste meio existe uma negociação entre o usuário primário (PU) e o usuário secundário (SU) de forma a permitir o acesso do SU à rede primária. Por ser um usuário licenciado, o PU informa aos SUs a disponibilidade dos canais na CRN através de um canal piloto. A presença de tal canal já é prevista nos padrões para redes de última geração (3GPP, 2006), a fim de facilitar a compartilhamento de informações entre usuários. A existência de um canal de sinalização para redes cognitivas, chamado *Cognitive Pilot Channel* (CPC) (WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010), é pré-requisito para o modo NSA.

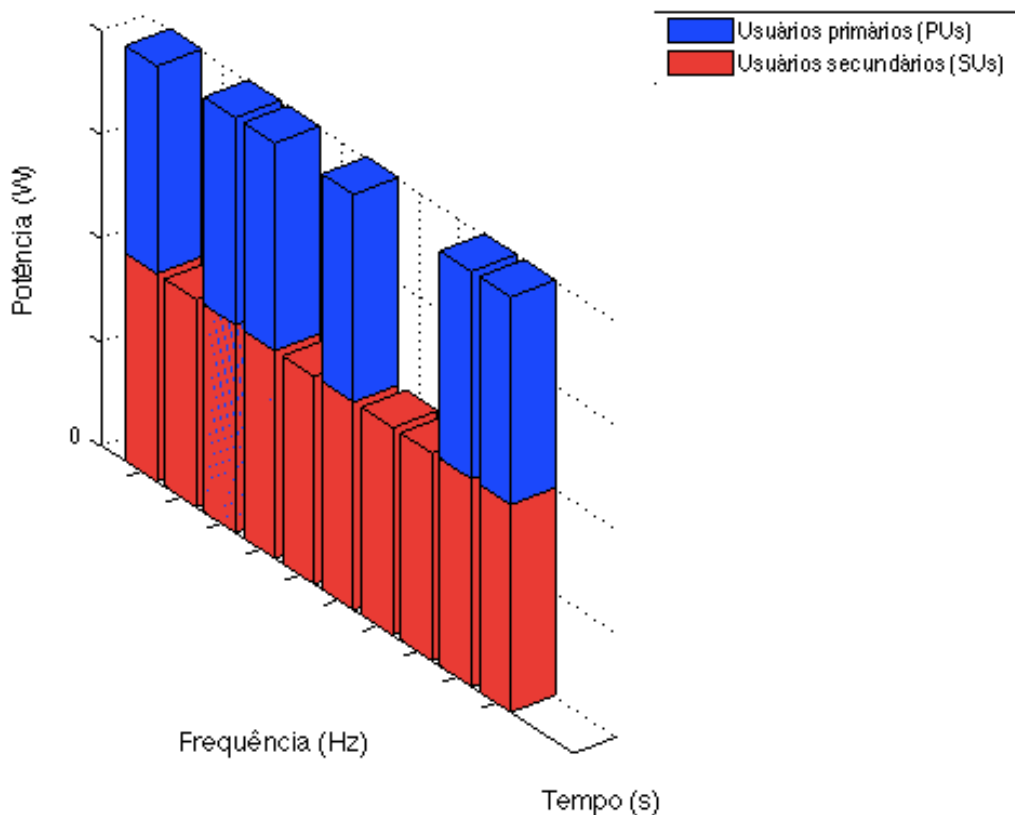
No modo OSA, de especial interesse para este trabalho, não há a necessidade de um CPC para a comunicação entre os usuários. A detecção e utilização de recursos disponíveis ocorre sem o conhecimento do usuário primário. O acesso no modo OSA é viabilizado através da tecnologia SDR/CR, que busca por *spectrum holes* e ajusta seus parâmetros de operação para alocação dos SUs em faixas não utilizadas do espectro. Estima-se que, em média, abaixo de 3 GHz, menos de cinco por cento do espectro seja utilizado (FETTE, 2006).

2.2.4 Underlay Access

O *Underlay Access* (UA) é um tipo de acesso OSA onde o usuário secundário utiliza a rede licenciada mesmo havendo presença do usuário primário. Para isso o SU deve respeitar critérios que evitem causar qualquer tipo de interferência no PU. Nessa situação afirma-se que o SU opera num modo de interferência controlada, utilizando técnicas como *notching* e *waveform adaptation* (WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010).

A Figura 2.2, mostra como a alocação no modo UA é realizada segundo Hossain, Niyato, Han (2009). Pode-se notar que o nível de potência utilizado pelos usuários secundários (SUs) é inferior ao dos usuários primários (PUs), a fim de evitar a interferência entre usuários.

Figura 2.2 - Operação no modo *underlay access*.



Fonte: adaptado de Hossain, Niyato, Han (2009).

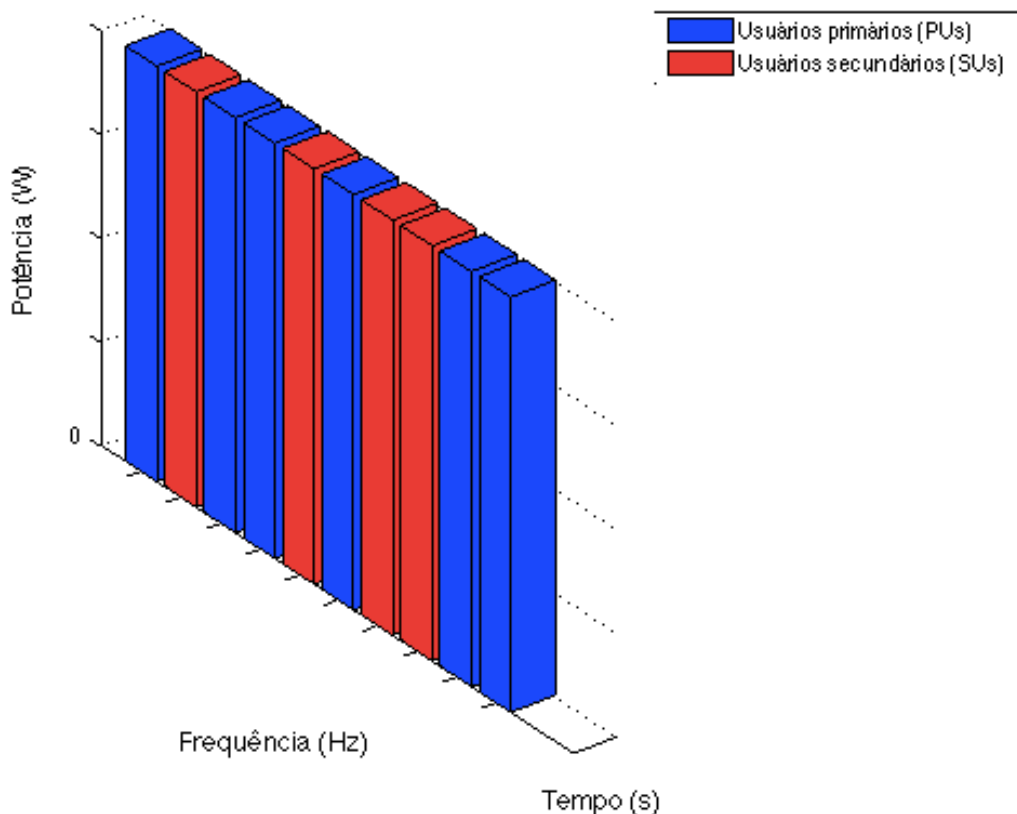
Apesar de ser mais propenso a causar interferência, o modo UA permite em algumas situações atingir melhores taxas de transmissão para o SU, pois consegue alocar faixas maiores do espectro. Além disso, também permite que mais SUs utilizem o espectro ao mesmo tempo que os PUs.

2.2.5 *Overlay Access*

No *Overlay Access* (OA) o SU acessa porções não utilizadas do espectro. Assim, o nível de interferência nos usuários primários é mínimo. Além disso, ao ocupar faixas que não estão em uso no espectro, o mesmo é utilizado de forma mais homogênea. Porém, como não há transmissão simultânea com os PUs, esse modo depende da disponibilidade de espaços no espectro para que os SUs possam transmitir.

A Figura 2.3, mostra como esse método ocupa o espectro segundo Hossain, Niyato, Han (2009). Nela pode-se observar que a transmissão dos SUs é realizada no mesmo nível de potência dos PUs, em função de não haver a preocupação com o cenário de interferência.

Figura 2.3 - Operação no modo *overlay access*.



Fonte: adaptado de Hossain, Niyato, Han (2009).

A transmissão no modo *overlay access* será utilizada no presente trabalho com o objetivo de alocar SUs em porções não ocupadas do espectro licenciado.

2.3 *Spectrum Sensing*

Uma parte extremamente importante na teoria de rádios cognitivos está na habilidade do CR em medir, detectar, aprender e ter conhecimento dos parâmetros relacionados às características do canal. Além disso, o CR deve ser capaz de detectar a disponibilidade do espectro, interferências, demandas de usuário e aplicações, disponibilidade de rede, entre outras (ARSLAN, 2007).

Para aplicação no contexto de CR o *Spectrum Sensing* (SS) precisa atender alguns requisitos importantes como altas taxas de amostragem, *Analog to Digital Converters* (ADCs) de alta resolução com larga faixa dinâmica, múltiplos circuitos analógicos de *front-end* e processadores de alta velocidade.

Como o usuário primário (PU) possui maior prioridade numa CRN, as ações de detecção ou *spectrum sensing* (SS) do usuário secundário (SU), devem estar sempre direcionadas na identificação da presença do PU. Assim, o uso da banda pode ser requisitado a qualquer momento pelos usuários licenciados. A fim de evitar a interferência entre PUs e SUs, o CR deve ser capaz de detectar a presença do PU e liberar o espectro de forma imediata (ARSLAN, 2007).

O modo de operação do SS numa CRN é chamado de *sensing mode*. Nesse modo uma função de detecção do espectro (SSF, do inglês *spectrum sensing function*), observa o espectro de radiofrequência para determinados tipos de sinais e reporta suas observações para a BS. Existe um período de tempo na CRN onde a BS cessa todas as transmissões em suas células para execução da SSF. Este período é chamado de *quiet period* (IEEE 802.22, 2011).

O padrão IEEE 802.22 especifica algumas técnicas para SS classificando-as em *blind sensing techniques* (BSTs) e *signal specific sensing* (SSTs).

Energy power detector, *eigenvalue sensing* e *multi-resolution sensing* são alguns exemplos que utilizam BSTs para detectar a presença de usuários.

Já para as SSTs, algumas técnicas utilizadas são a *ATSC FFT-based pilot sensing*, *spectral correlation sensing* e *ATSC cyclostationary sensing* (IEEE 802.22, 2011).

2.4 Arquitetura da Rede de Rádios Cognitivos

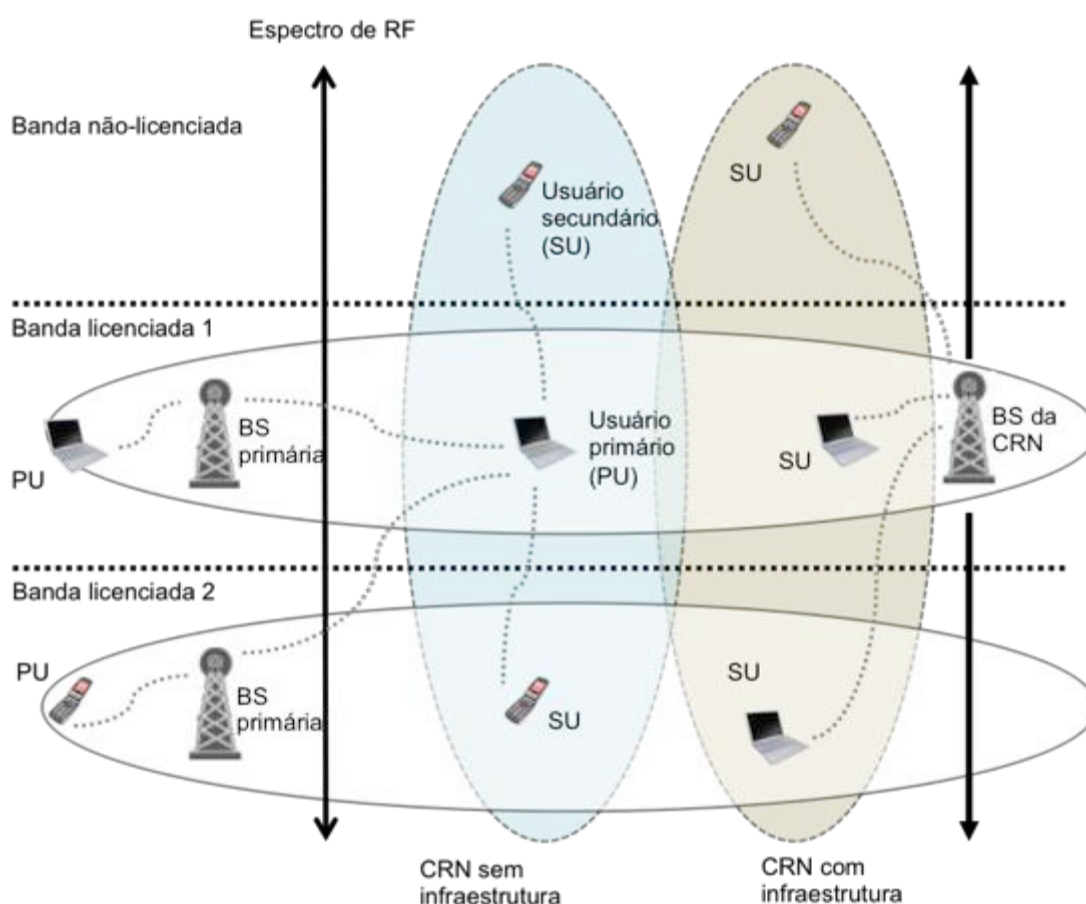
Numa topologia centralizada, uma rede cognitiva opera de forma que um elemento controlador central é responsável pelo gerenciamento do espectro e dos usuários de determinada região. Por consequência, nesse modelo há a necessidade de uma infraestrutura específica (*base station*) para a rede cognitiva.

Na topologia distribuída a *base station* não existe e todas informações referentes à disponibilidade da CRN são trocadas diretamente entre os usuários

(HOSSAIN; NIYATO; HAN, 2009). Esta troca de informações ocorre através do *cognitive pilot channel* (CPC). No entanto, nessa topologia os terminais de usuários precisariam agregar capacidade de processamento e inteligência superiores aos terminais utilizados atualmente nas redes *wireless*.

A Figura 2.4, mostra uma topologia básica de uma rede cognitiva onde pode-se observar os dois tipos possíveis: com infraestrutura e sem infraestrutura (BROADBAND WIRELESS NETWORKING LAB, 2006).

Figura 2.4 - Topologia básica de uma rede de rádios cognitivos.

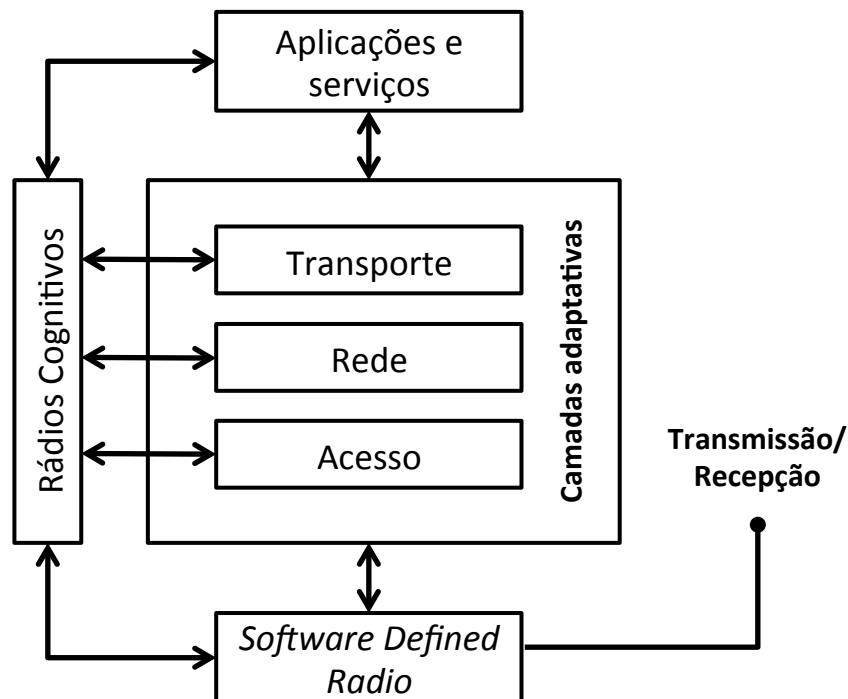


Fonte: adaptado de Broadband Wireless Networking Lab (2006).

A pilha de protocolos num CR é mostrada na Figura 2.5. Nela pode-se observar que as camadas de transporte, rede e *media access control* (MAC) são atualizadas com as informações do ambiente da CRN através do bloco de controle chamado Rádios Cognitivos. Logo, informações como a presença de usuários primários e secundários, disponibilidade de canais, entre outras, são utilizadas pelo *Spectrum Manager* do bloco CR para alterar as características de operação do *SDR transceiver*. Assim, as alterações no modo de operação do CR têm como objetivo

atender os requisitos de serviços repassados pela camada de aplicação e serviços (HOSSAIN; NIYATO; HAN, 2009).

Figura 2.5 - Pilha de protocolos de um radio cognitivo.



Fonte: adaptado de Hossain, Niyato, Han (2009).

2.5 Métodos de Alocação de Canal

Os algoritmos de atribuição de canais podem ser classificados, conforme sua distribuição nas células, em *Fixed Channel Allocation (FCA)*, *Dynamic Channel Allocation (DCA)* e *Hybrid Channel Allocation (HCA)* (GLISIC; LORENZO, 2009). Nas próximas seções as principais características desses métodos serão apresentadas.

2.5.1 *Fixed Channel Allocation*

No modo FCA um conjunto nominal de canais está permanentemente alocado à cada célula para seu uso exclusivo. Em função disso, uma relação definitiva entre canal e célula fica estabelecida, porém respeitando as regras de reuso de frequência. Assim, o número de canais disponíveis no sistema é dividido em conjuntos de forma a atender as células dentro da área de cobertura desejada. Como exemplo de tecnologias que usam o FCA pode-se citar o *Time Division*

Multiple Access (TDMA) e o *Global System for Mobile communications* (GSM) (GLISIC; LORENZO, 2009).

2.5.2 *Dynamic Channel Allocation*

A principal diferença entre o método FCA e o *Dynamic Channel Allocation* (DCA) está relacionado ao fato de que no DCA não existe uma associação estática dos canais com as células. Todos os canais são mantidos em um *pool* central e vão sendo atribuídos dinamicamente às células conforme o crescimento do tráfego na rede. Quando os canais são liberados, são devolvidos pelas células ao *pool* central. Esquemas como o *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), utilizado no *downlink* de sistemas *Long Term Evolution* (LTE) fazem uso desta técnica (KIM; WANG, 2013) e (TONG-HUI; LIANG; ZHUO-MING; JIN, 2012). Como exemplo de redes que utilizam o esquema DCA pode-se citar as *Wireless Local Area Network* (WLAN) (MATSUMURA; KUMAGAI; OBARA; YAMAMOTO; ADACHI, 2012).

2.5.3 *Hybrid Channel Allocation*

O método HCA é uma mistura das técnicas FCA e DCA vistas anteriormente. Através do modo HCA, o número total de canais disponíveis é dividido em dois conjuntos, sendo um fixo e outro dinâmico. O conjunto fixo contém uma quantidade de canais específicos que são atribuídos às células da mesma forma que no esquema FCA. Esses canais sempre terão a prioridade de atribuição em suas respectivas células. O conjunto dinâmico é compartilhado entre todos os usuários da rede adicionando flexibilidade ao esquema de alocação de canais. Assim, quando uma célula já estiver usando todos os seus canais e receber novas requisições de usuário, poderá solicitar um empréstimo de canais ao conjunto dinâmico. Quando os mesmos forem liberados pelos usuários, serão devolvidos (GLISIC; LORENZO, 2009).

Em função da componente aleatória presente nas variações temporais e espaciais do tráfego de uma rede celular, os métodos do tipo FCA não conseguem atingir uma grande eficiência em termos de utilização de canal. Por apresentar um

uso otimizado do espectro, os conceitos da técnica DCA são aplicados neste trabalho. No sistema proposto, um elemento central da CRN (*base station*) é responsável pelo controle e alocação dos canais aos usuários secundários (SUs), através do *Spectrum Manager*. Dessa forma, de acordo com a demanda dos usuários, os canais vão sendo atribuídos e, ao final da utilização, são devolvidos ao controle da BS. No presente trabalho não se considera uma associação geográfica com relação à distribuição dos canais, semelhante ao que ocorre na FCA e HCA.

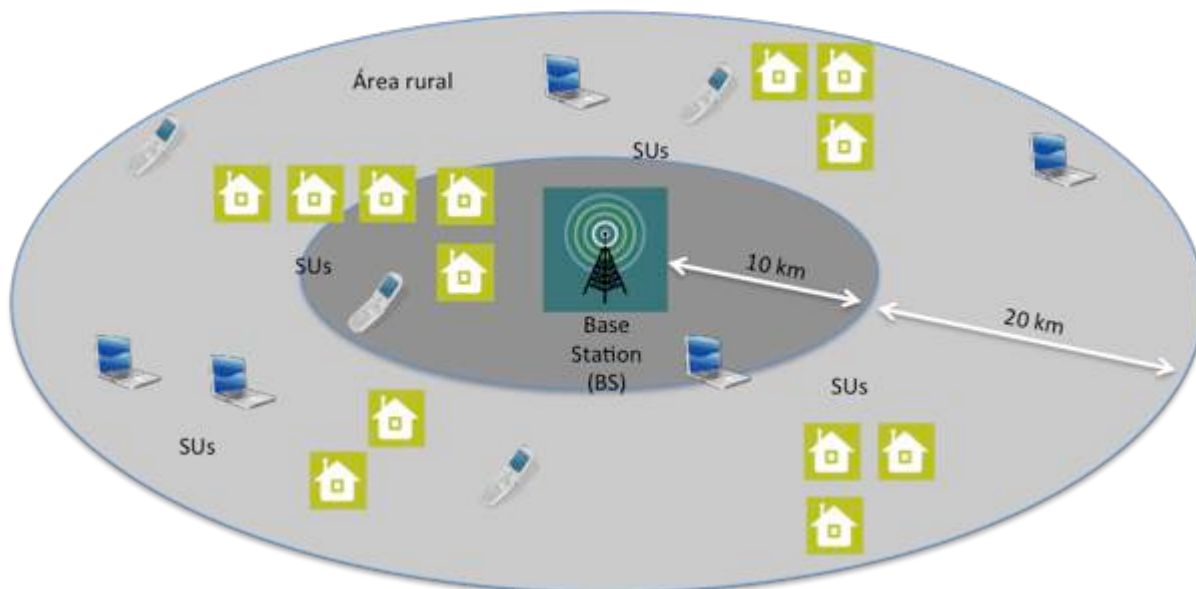
3 IEEE 802.22

As *Wireless Regional Area Networks* (WRANs) são redes especificadas segundo o padrão IEEE 802.22, para utilização da tecnologia de rádios cognitivos em faixas do espectro de TV. A utilização das WRANs é prevista para regiões de baixa densidade populacional, tipicamente em zonas rurais. O padrão prevê o uso de *white spaces* nos espectros de VHF e UHF, operando numa faixa que vai de 54 MHz a 862 MHz com larguras de canal variando de 6 MHz a 8 MHz.

Espera-se que uma *base station* (BS) operando segundo a IEEE 802.22 seja capaz de atender até 512 dispositivos de usuários (CPEs) em sua área de cobertura. A WRAN deve fornecer serviços de internet de alta velocidade, considerando as diferentes demandas de QoS dos CPEs. A IEEE 802.22 especifica ainda, o uso de técnicas de *cognitive radio* para mitigar interferência nos usuários licenciados (PUs), acesso à base de dados da rede primária e o uso de tecnologias de *spectrum sensing* (SS) para detecção de usuários e outros sistemas WRAN (IEEE 802.22, 2011).

A Figura 3.1 ilustra um cenário utilizando a WRAN numa localidade em zona rural, onde o raio de cobertura ao redor da estação rádio-base (BS) pode variar de 10 a 30 km.

Figura 3.1 - Cenário utilizando WRAN para atendimento em zona rural.



Fonte: adaptado da IEEE 802.22 (2011).

O plano cognitivo ou *cognitive plane* (CP) de uma WRAN é formado por todas as entidades relacionadas a funções cognitivas na arquitetura da IEEE 802.22. As funções cognitivas são executadas pelo *Spectrum Sensing Function* (SSF), função de Geolocalização (GL), *Spectrum Manager* (SM), *Spectrum Sensing Automaton* (SSA) e uma subcamada de segurança de nível 2 (IEEE 802.22, 2011).

No sistema proposto são implementados módulos que desempenham parte das funções atribuídas ao *Spectrum Manager*, *Database Service* (DS) e *Spectrum Sensing Function* especificados na IEEE 802.22. Assim, ao longo deste trabalho, serão recorrentes analogias com esses elementos da arquitetura da WRAN.

3.1 *Spectrum Manager*

O SM é responsável por manter as informações de disponibilidade do espectro, gerenciar listas de canais e agendar os *quiet periods*, que são períodos destinados ao sensoriamento do espectro. Além disso, também é função do SM implementar mecanismos de coexistência numa rede WRAN. Numa situação de detecção de interferência durante a utilização do canal, por exemplo, o SM deve tomar ações apropriadas para mover o usuário secundário (SU) para outro canal.

A decisão de qual canal será utilizado na célula da CRN, assim como especificar os limites de potência de transmissão a serem utilizados pelos *Customer Premisse Equipments* (CPEs) também são de responsabilidade do SM. Esta entidade faz parte do plano cognitivo da BS e recebe informações do *Database Service* (DS), do *Spectrum Sensing Automaton* (SSA) e dos CPEs. Assim, o *Spectrum Manager* (SM) possui extrema importância na arquitetura da WRAN.

As informações de disponibilidade do espectro recebidas do DS e da SSA são reunidas e, juntamente com políticas de uso do espectro e regulamentações regionais, provêm os parâmetros necessários para configuração dos CPEs registrados na rede.

O SM também é responsável pela aplicação das políticas de proteção do PU determinadas pela IEEE 802.22, além prover QoS aos usuários da WRAN (IEEE 802.22, 2011). Além disso, esta entidade é responsável por acessar o DS, esteja ela nos domínios do órgão regulatório ou da operadora.

De acordo com a situação detectada na rede, o SM deve ser capaz de executar ações tais como:

- Mudar uma célula inteira para um novo canal de operação.
- Direcionar um CPE ou grupo de CPEs para um novo canal.
- Encerrar a utilização em determinado canal ou célula para um CPE ou grupo de CPEs.

A Figura 3.2 mostra as *interfaces* lógicas do SM com as demais funções do plano cognitivo (IEEE 802.22, 2011).

Figura 3.2 - *Spectrum Manager* e suas *interfaces* lógicas.



Fonte: adaptado da IEEE 802.22 (2011).

3.1.1 Manutenção de Informações de Disponibilidade de Espectro

Cabe ao SM obter as informações de disponibilidade de canais na rede com relação a presença de PUs e outras WRANs na mesma área. Estas informações serão usadas pelo SM para realizar a seleção dos canais e gerenciamento da situação dos mesmos. Para manter as informações de disponibilidade de canais o SM deve se comunicar constantemente com o *Database Service* (DS), *Spectrum Sensing* (SS) e Geolocalização (GL).

Através do DS o SM tem acesso à base de dados dos usuários licenciados. Esta base pode estar nos domínios da operadora ou do órgão regulatório, sendo que, em qualquer um deles, deverá conter a informação de disponibilidade dos canais, bem como os níveis de potência de transmissão permitidos para esses canais.

Utilizando as camadas MAC (*media access control*) e PHY (*physical layer*) para se comunicar com a entidade de SS, o SM controla e coordena as ações de

detecção de espectro na WRAN. O SM é responsável por disparar as requisições aos SSAs localizados na BS e CPEs solicitando o sensoriamento do espectro e a geração de relatórios de ocupação do mesmo.

Além da localização da própria BS, a função GL deve fornecer também as informações de localização dos usuários na área de cobertura da BS, bem como dos usuários que solicitam acesso à região atendida pela BS.

Assim, o SM deverá obter a situação dos canais disponíveis através da combinação das informações recebidas do DS, SSA e GL (IEEE 802.22, 2011).

3.1.2 Classificação e Seleção dos Canais

Os canais elegíveis para serem utilizados numa WRAN em determinada região e de acordo com o *Database Service* são classificados de acordo com as seguintes categorias: *Disallowed*, *Operating*, *Backup*, *Candidate*, *Protected* e *Unclassified*. As classificações são mutuamente exclusivas, ou seja, um mesmo canal não pode ser classificado em duas categorias. Ao final dos *quiet periods* os canais podem se mover na lista de classificação, dependendo da atividade dos PUs e da qualidade dos canais informados pelo SSA. Em casos onde o mesmo canal está presente em duas WRANs diferentes, mecanismos de coexistência são implementados para evitar cenários de colisão.

Dentre as categorias utilizadas para classificação dos canais, o presente trabalho irá considerar os cenários onde os canais das categorias *operating* e *backup* estão presentes. O canal *operating* é utilizado para comunicação entre a BS e os CPEs na célula da WRAN. O canal *backup* é aquele que está disponível para se tornar um canal *operating* a qualquer momento, caso a WRAN necessite mudar do atual canal *operating* para um novo canal.

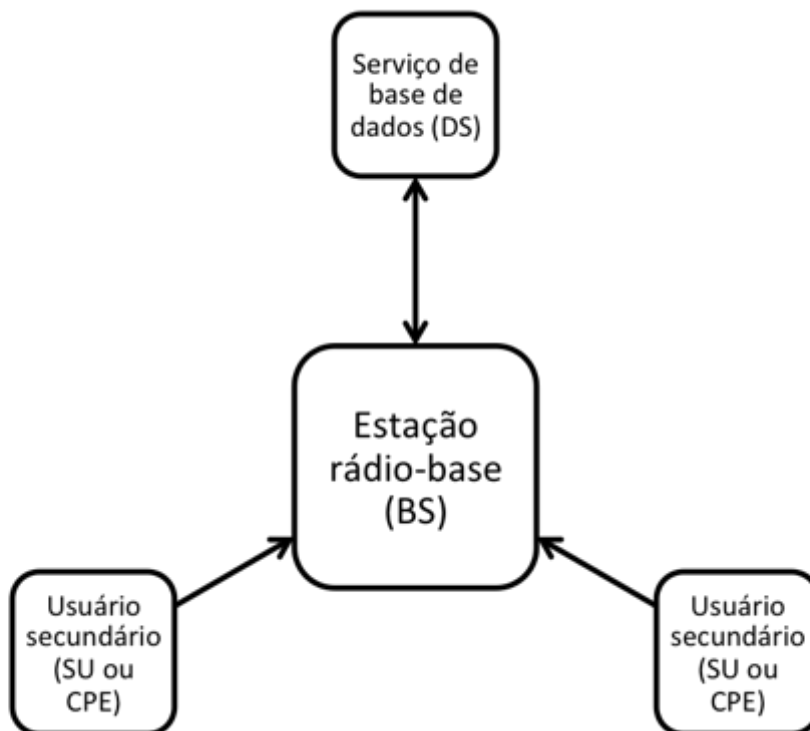
No contexto deste trabalho, quando o SU receber uma lista de canais para utilização, o primeiro canal da lista é o *operating* e os demais são canais *backup*. Se o canal *operating* estiver ocupado no momento do *spectrum sensing*, o primeiro canal da lista de canais *backup* se torna *operating* e o primeiro canal *operating* que apresentou falha é devolvido para o controle do *Spectrum Manager*.

3.2 Database Service

Pelo menos uma vez por dia a BS deve se comunicar com o *Database Service* (DS) para obter a situação dos canais disponíveis. Esta comunicação ocorre através de mensagens especificadas na IEEE 802.22. No sentido inverso, o DS pode enviar atualizações da lista de canais para a BS, através de notificações do tipo *internet push* (COLLINS, 1997). Assim, atualizações importantes não necessitam aguardar a comunicação da BS com o DS que, em alguns casos, pode ocorrer apenas a cada 24 horas.

A segurança na comunicação entre a BS e o DS é um fator que foi considerado crítico na elaboração da IEEE 802.22. Assim, as mensagens trocadas entre essas duas entidades utilizam o protocolo *Security Socket Layer* (SSL) (IETF, 2011).

A Figura 3.3 mostra como os elementos da WRAN se comunicam com o DS. Os SUs não tem acesso direto ao serviço de base de dados. Dessa forma, informações enviadas pelos usuários, como dados de utilização de canal, por exemplo, são repassados ao DS através do *Spectrum Manager* que fica na *base station*. A comunicação do DS com a *base station* ocorre nos dois sentidos e serve para manter a lista de canais atualizada, com base nas informações recebidas dos usuários.

Figura 3.3 - Arquitetura de acesso ao *Database Service* (DS).

Fonte: adaptado da IEEE 802.22 (2011).

Para obter a informação de disponibilidade de canais, por exemplo, a BS deve enviar uma mensagem M-DB-AVAILABLE-CHANNEL-REQUEST para o DS. Esta mensagem faz parte de um conjunto de informações trocadas entre BS e DS, chamado *Database Service Primitives*. Através destas mensagens, as informações referentes a disponibilidade de canais são trocadas entre os elementos da CRN (IEEE 802.22, 2011).

Quando a WRAN operar num cenário onde não há um serviço de base de dados disponível, o SM assume que todos os canais inicialmente estão livres. Assim, a informação de disponibilidade real dos canais será definida durante a inicialização da rede e atualizada durante a operação da mesma.

3.3 *Spectrum Sensing Automaton*

Spectrum sensing é o processo de observar o espectro de RF para determinar sua ocupação, seja por usuários licenciados ou CPEs de outras WRANs.

Os dispositivos de uma CRN (BSs e CPEs), devem possuir uma entidade chamada *Spectrum Sensing Automaton* (SSA) que é responsável pela execução da função de *spectrum sensing* (SSF). O SSF executa comandos enviados pelo *Spectrum Manager* (SM) para realizar o sensoriamento do espectro. Através da camada MAC a *base station* consegue gerenciar a operação das SSFs de todos os CPEs em sua área de cobertura.

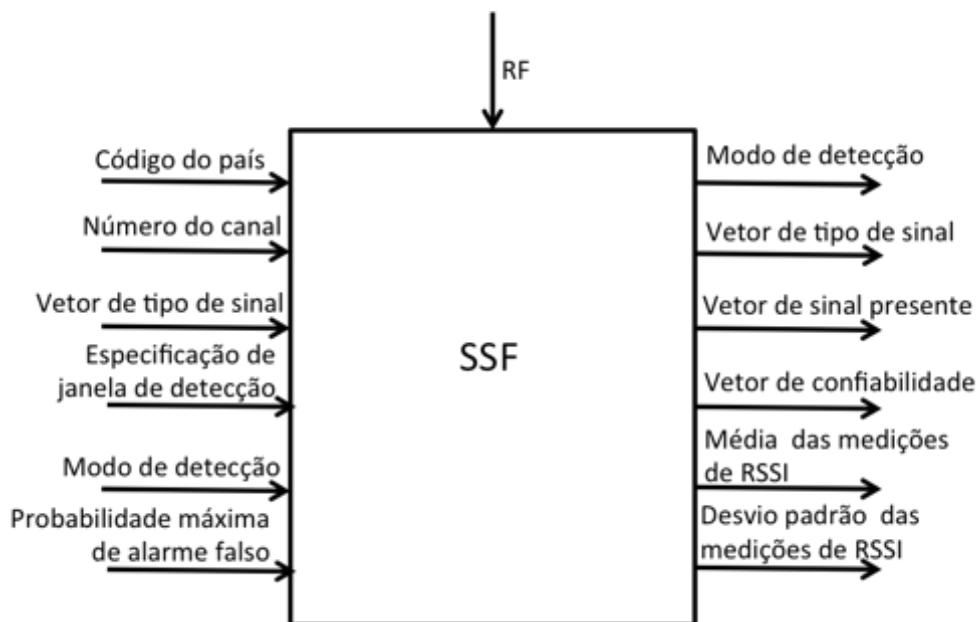
Normalmente o comportamento do SSA é controlado pelo SM. No entanto, em algumas situações, o SSA pode operar em modo local, sem a interferência do SM. Os cenários onde tal situação ocorre são os seguintes (IEEE 802.22, 2011):

- 1) Quando a BS é ligada pela primeira vez antes de transmitir qualquer sinal;
- 2) Quando o CPE é ligado, antes de estabelecer uma conexão com a BS;
- 3) Durante os *quiet periods* definidos pelo SM na área de cobertura da BS;
- 4) Fora da área de cobertura da BS quando esta não está transmitindo;
- 5) Durante tempo livre do CPE, quando a BS não atribuiu nenhuma tarefa específica ao CPE;
- 6) Quando o CPE perde contato com a BS.

A Figura 3.4 mostra algumas entradas e saídas possíveis para o módulo SSF (IEEE 802.22, 2011). Dentre elas, pode-se destacar as seguintes:

- **RF**: sinal de RF detectado e recebido da antena.
- **Número do canal**: representa a indicação de qual canal deverá ser realizado o *sensing*.
- **Largura do canal**: indica a largura do canal, que pode variar de 6 MHz a 8 MHz.
- **Vetor de tipo de sinal**: informa os tipos de sinais que o SSF deverá detectar.
- **Modo de detecção**: especifica as saídas válidas do SSF e, em alguns casos, informa o comportamento do SSF.

Figura 3.4 - Entradas e saídas do SSF.



Fonte: adaptado de IEEE 802.22 (2011).

O Anexo C da IEEE 802.22 sugere algumas técnicas de SS a serem utilizadas pelo SSF (IEEE 802.22, 2011). Tais técnicas são classificadas em *Blind Sensing* e *Signal Specific Sensing* e o uso das mesmas é opcional. Como exemplo de técnicas *Blind Sensing*, pode-se citar o *Energy Power Detector*, *Eigenvalue Sensing* e *Multi-Resolution Sensing*. Técnicas como *ATSC FFT-based Pilot Sensing*, *Spectral Correlation Sensing* e *ATSC Cyclostationary Sensing* são classificadas como *Signal Specific Sensing* e também são abordadas no Anexo C da IEEE 802.22.

O SSF é umas das principais interfaces do SM no plano cognitivo e, em função disso, possui papel importante na arquitetura do sistema desenvolvido. No entanto, por não fazerem parte do escopo deste trabalho, as técnicas de detecção de usuário (*Spectrum Sensing*) não serão abordadas. Assim, as respostas do SSF para o SM se limitarão a informar se há presença do usuário no canal ou não. No Capítulo 5 a implementação deste mecanismo será detalhada.

4 Modelagem de Espectro

A modelagem do espectro é um procedimento bastante utilizado no planejamento de frequências. Seu principal objetivo é reproduzir com precisão a ocupação dos canais e propiciar um ambiente de teste condizente com a realidade. Normalmente, esta precisão é medida fazendo a validação com medições reais utilizando analisadores de espectro. Em função da grande variedade de tecnologias utilizando o espectro atualmente, os cenários numa rede de rádios cognitivos (CRN) tornam-se bastante complexos, aumentando também a complexidade dos modelos utilizados.

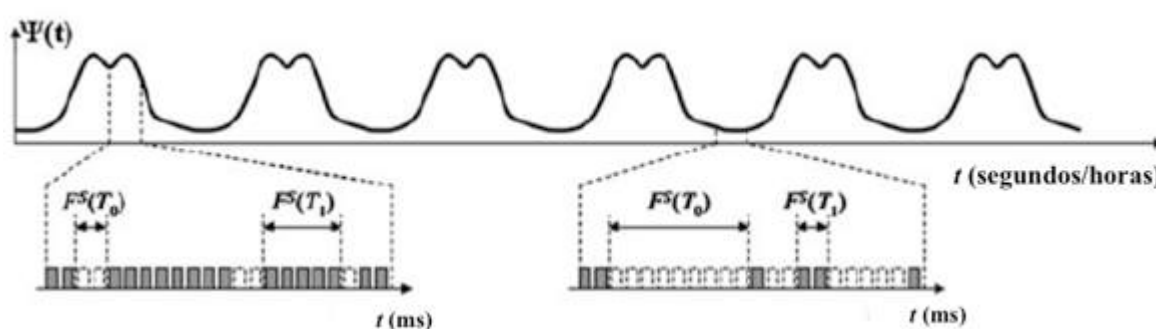
Segundo López-Benítez, Casadevall (2011b), os modelos de domínio tempo podem ser classificados em dois grupos: Modelos de Tempo Discreto e Modelos de Tempo Contínuo. Dentro do primeiro grupo encontram-se os modelos estacionários e não-estacionários. Um exemplo de aplicação para um modelo estacionário seria a geração de dados de uma transmissora de sinal de TV, onde o nível de sinal é, na maior parte do tempo, presente e constante. Já os modelos não-estacionários, que são de maior interesse para esse trabalho, possuem maior complexidade devido à imprevisibilidade do usuário. Os modelos não-estacionários podem ser classificados ainda em determinísticos e/ou estocásticos. Numa rede celular, de especial interesse para este trabalho, apesar de haver uma aleatoriedade no comportamento dos usuários, ainda assim é possível identificar uma componente determinística na utilização desta rede. Isto fica bastante evidente se avaliarmos o tráfego em períodos comerciais e finais de semana. Por isso, a combinação dos modelos estocástico e determinístico é capaz de determinar não somente o nível médio de ocupação dos canais, mas também propriedades estatísticas como utilização e não-utilização ao longo do tempo (VENKATARAMAN, 2012).

Dentro do grupo de modelos de tempo contínuo, estes podem ser classificados do ponto de vista da observação dos canais, como modelos do tipo *Low Time-resolution* (LTR) e *High Time-resolution* (HTR) (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b). Os modelos LTR indicam observações com taxas de amostragem inferiores às transições de livre para ocupado do canal. Nesse caso,

pode ficar caracterizado um problema de subamostragem, pois o estado do canal pode mudar mais de uma vez entre os períodos de observação. No entanto, considerando o ponto de vista de um DSA/CR, que periodicamente verifica a rede em busca de *white spaces*, torna-se uma abordagem bastante útil. Já os modelos do tipo HTR são úteis para representar com precisão a ocupação do canal em curtos períodos de tempo. Isto é possível porque sua taxa de amostragem para observação é superior às transições de livre para ocupado do canal (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b).

Um artifício bastante válido no contexto de DSA/CR, especialmente para representação de sistemas GSM e DCS, é a combinação dos modelos LTR e HTR. Assim, porções do espectro são amostradas usando o modelo LTR ao longo de um período de tempo maior (segundos ou horas). Através do modelo HTR, o comportamento dos canais dentro das amostras obtidas com o modelo LTR pode ser amostrado e detalhado com precisão. A Figura 4.1 mostra a combinação dos modelos LTR e HTR para representação da ocupação de canais de sistemas GSM e DCS. As funções de distribuição $F^s(T_0)$ e $F^s(T_1)$ representam, respectivamente, o tamanho dos ciclos de livre e ocupado dos canais, considerando uma escala de tempo pequena (microsegundos ou milissegundos).

Figura 4.1 - Combinação dos modelos *low/high time-resolution* para representação de sistemas GSM e DCS.



Fonte: adaptado de López-Benítez, Casadevall (2011b).

Neste trabalho, o uso de técnicas de modelagem de espectro visa a construção de uma base de dados com informações estatísticas de utilização dos canais. Esta estratégia foi adotada para simular a utilização de canais em faixas licenciadas do espectro, num cenário o mais próximo possível da realidade. Dessa

forma, é possível identificar os canais com pouca utilização e priorizá-los no processo de alocação, por estatisticamente apresentarem menor ocupação.

As faixas de frequência consideradas para este trabalho são TETRA, GSM 900 e DCS 1800, que são utilizadas para serviço celular. Através da combinação dos modelos não-estacionários (determinístico e/ou estocástico), juntamente com os modelos de tempo contínuo (LTR e HTR) é possível gerar dados de ocupação do espectro nos domínios tempo e frequência.

Os parâmetros considerados essenciais no algoritmo de modelagem de espectro apresentado neste capítulo são os seguintes (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b):

- **Duty Cycle:** é uma métrica utilizada para representar a probabilidade de um canal estar ocupado.
- **Distribuição Beta:** é utilizada para gerar os valores de *duty cycle* que serão atribuídos aos canais.
- **Distribuição Geométrica:** é utilizada para determinar o tamanho dos *clusters* ou agrupamento no domínio frequência de canais com valores de *duty cycle* similares.
- **Distribuição Pareto Generalizado:** é utilizada para determinar o tamanho dos ciclos de livre e ocupado dos canais no domínio tempo.

O algoritmo de modelagem de espectro apresentado neste capítulo foi validado pelos autores com dados obtidos através de medições. Dessa forma, preservam as propriedades estatísticas do sinal originalmente medido (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL; LÓPEZ-PÉREZ; VASILAKOS, 2011).

4.1 *Duty Cycle*

O *duty cycle* (DC), usualmente designado por Ψ , é uma métrica utilizada em modelos de utilização de espectro que reproduz a probabilidade de um canal estar ocupado (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b).

Em algumas situações a ocupação dos canais pode ser caracterizada por uma componente determinística que pode estar presente no perfil de redes de

tecnologia celular como o GSM, DCS e TETRA. No entanto, o comportamento dos canais nessas redes, também está sujeito a uma componente aleatória devido à imprevisibilidade do usuário. Assim, um modelo não-estacionário, que considera as componentes determinísticas e estocásticas, pode reproduzir com precisão o DC médio dos canais e suas propriedades estatísticas.

A distribuição Beta (PAPOULIS, 2002), é uma ferramenta bastante utilizada em simulações e pode representar a componente estocástica do DC de um canal (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b). Esta distribuição é representada pela Equação 4.1.

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 z^{\alpha-1} (1-z)^{\beta-1} dz \quad (4.1)$$

Onde $\alpha > 0$ e $\beta > 0$, sendo que α e β representam os parâmetros de *shape* da distribuição.

A resposta dada pela distribuição Beta (DB), ao ser comparada com dados experimentais empíricos, apresenta bastante similaridade. Sendo assim, é possível afirmar que esta distribuição pode representar com precisão os períodos de ocupado de um canal. A distribuição Kumaraswamy (DK) (JONES, 2009), é similar à Beta e também apresenta resultados satisfatórios, podendo ser utilizada para o mesmo fim. No entanto, enquanto a DK é mais apropriada para estudos analíticos, a DB é mais utilizada em simulações (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b).

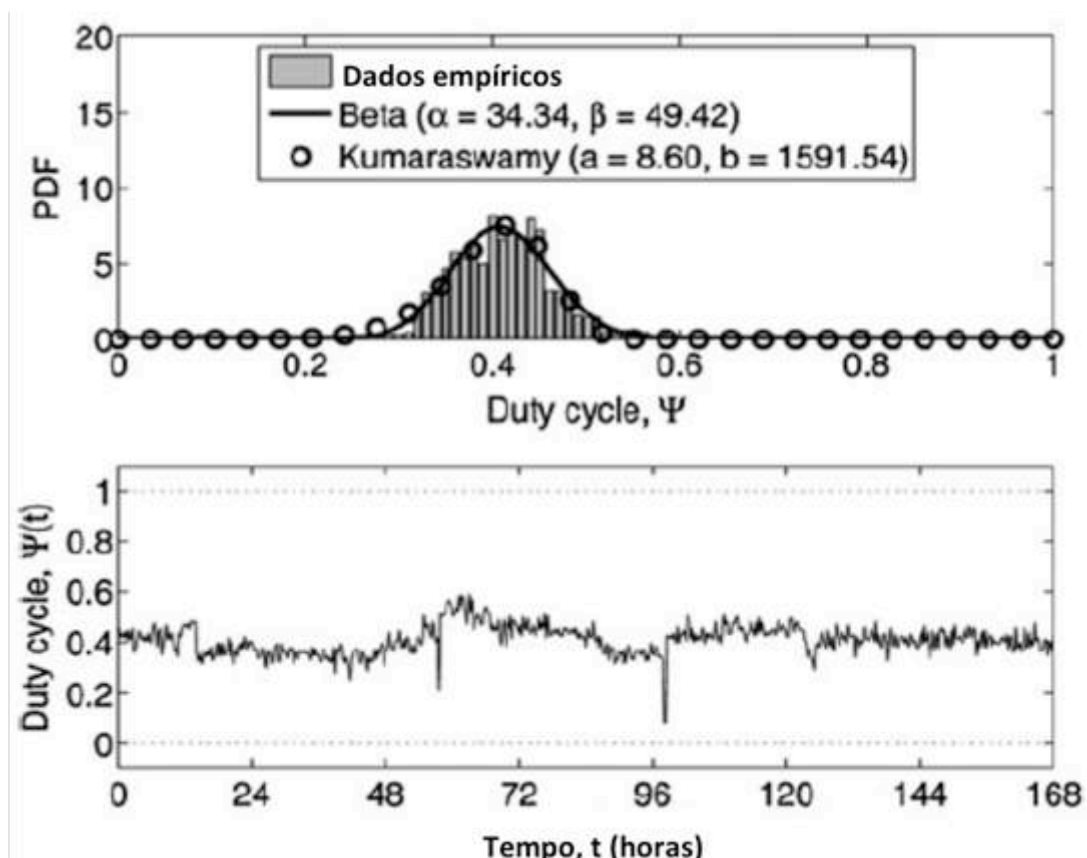
O gráfico superior da Figura 4.2 apresenta uma comparação da função densidade de probabilidade (PDF, do inglês *Probability Density Function*) de valores medidos com a resposta das distribuições Beta e Kumaraswamy. As PDFs das duas distribuições são representadas pela Equação 4.2 (Beta) e Equação 4.3 (Kumaraswamy) (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b).

$$f_x^B(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, \quad x \in (0, 1) \quad (4.2)$$

$$f_x^K(x; a, b) = abx^{a-1} (1-x^a)^{b-1}, \quad x \in (0, 1) \quad (4.3)$$

O gráfico inferior na Figura 4.2 indica a ocupação de canais no domínio tempo, para uma utilização em torno de 50%.

Figura 4.2 - Comparação de dados empíricos com dados gerados pelas distribuições Beta e Kumaraswamy.



Fonte: adaptado de López-Benítez, Casadevall (2011b).

Conforme visto anteriormente, o *duty cycle* representa a probabilidade de o canal estar ocupado em determinado instante. Para a distribuição Beta e Kumaraswamy, ele pode ser determinado pela Equação 4.4 (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b).

$$\psi = \begin{cases} \frac{\alpha}{\alpha + \beta} & (DB) \\ bB\left(1 + \frac{1}{a}, b\right) & (DK) \end{cases} \quad (4.4)$$

A Tabela 4.1 apresenta valores de referência para os parâmetros da DB e DK. Com esses valores é possível representar o *duty cycle* dos canais nas bandas de *uplink* (UL) e *downlink* (DL), para as faixas TETRA, GSM 900 e DCS 1800, que são as bandas de interesse para este trabalho. Na coluna *Average DC* é possível observar o valor médio do *duty cycle* para cada uma das bandas (LÓPEZ-BENÍTEZ, CASADEVALL, LÓPEZ-PÉREZ, VASILAKOS, 2011).

Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros das distribuições Beta e Kumaraswamy para representação do *duty cycle*.

| Banda | DC, ψ (valor médio) | Beta | | Kumaraswamy | |
|-------------|-----------------------------|----------|----------|-------------|----------|
| | | α | β | a | b |
| TETRA UL | 0,03 | 1,4105 | 44,0554 | 0,7849 | 26,9302 |
| TETRA DL | 0,36 | 0,154 | 0,2837 | 0,1389 | 0,4223 |
| GSM 900 UL | 0,02 | 2,4044 | 116,6408 | 1,269 | 208,5805 |
| GSM 900 DL | 0,96 | 1,8119 | 0,0778 | 0,897 | 0,0786 |
| DCS 1800 UL | 0,02 | 0,1423 | 6,0738 | 0,2545 | 2,6118 |
| DCS 1800 DL | 0,44 | 0,4525 | 0,6118 | 0,4463 | 0,6846 |

Fonte: adaptado de López-Benítez, Casadevall, López-Pérez, Vasilakos (2011).

4.2 Modelos de Domínio Tempo

A distribuição que melhor vai representar o tamanho dos ciclos de livre e ocupado dos canais depende do tipo de tecnologia do canal e do tempo que o mesmo é observado (*time resolution*). Uma distribuição que apresenta bons resultados para representação no domínio tempo dos ciclos de ocupado e livre, comparado com dados empíricos, é o Pareto generalizado (GP, do inglês *Generalized Pareto*) (GEIRHOFER; TONG; SADLER, 2006). Embora outras distribuições possam apresentar melhores resultados para bandas específicas, em média, a GP apresenta os melhores resultados para uma grande faixa de canais, tanto para períodos de livre quanto ocupado (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b). Dessa forma, será a distribuição utilizada no sistema aqui proposto.

A Tabela 4.2 destaca distribuições de probabilidade utilizadas para representar as faixas de interesse deste trabalho, utilizando modelos do tipo *high time-resolution*. Tais modelos serão abordados na sequência deste capítulo (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b).

Tabela 4.2 - Distribuições de probabilidade para modelos *high time-resolution*.

| Tecnologia | Ciclo livre | Ciclo ocupado |
|------------|-------------|---------------|
| TETRA | W ou GP, P | GP, P ou W |
| GSM/DCS | GE, G | GP |

Onde:

P = Pareto; GE = Exponencial Generalizada

W = Weibull; G = Gama

GP = Pareto Generalizado

Fonte: adaptado de López-Benítez, Casadevall (2011b).

Um valor médio qualquer de *duty cycle* (DC) pode ser obtido selecionando os parâmetros da distribuição de tal forma que atenda a igualdade na Equação 4.5.

$$\bar{\Psi} = \frac{E\{T_1\}}{E\{T_0\} + E\{T_1\}} \quad (4.5)$$

Na Equação 4.5, $E\{T_0\}$ e $E\{T_1\}$ representam a duração esperada dos períodos de livre e ocupado, onde E representa o valor esperado e T é a variável aleatória. Para a distribuição GP, estes valores são obtidos através da Equação 4.6.

$$E\{T_i\} = \mu_i + \frac{\lambda_i}{1-\alpha_i}, i \in \{0,1\} \quad (4.6)$$

Na Equação 4.6, μ , λ e α representam, respectivamente, os parâmetros *location*, *scale* e *shape* da distribuição (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b). Assim, ajustando os parâmetros das equações 4.5 e 4.6 para chegar nos valores DC médios da Tabela 4.1, é possível obter os parâmetros da distribuição GP.

Os valores iniciais de *location*, *scale* e *shape* utilizados na Equação 4.6 foram obtidos com base em outro trabalho dos autores sobre o mesmo tema (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011a).

A Tabela 4.3 apresenta os valores dos parâmetros *location*, *scale* e *shape* para a distribuição GP, equivalentes aos valores de DC médio das bandas de interesse. Os valores desta tabela representam um ponto de partida para o algoritmo que ajusta os parâmetros da GP, uma vez que o DC apresentado representa o valor médio de todos os DCs da banda em questão. O algoritmo que implementa esta representação é detalhado na Seção 4.4.

Tabela 4.3 - Valores dos parâmetros da distribuição GP para obtenção do DC.

| Banda | Duty cycle | Ciclo | Parâmetros GP | | |
|-------------|------------|-----------|---------------|--------|--------|
| | | | Location | Scale | Shape |
| TETRA UL | 0,03 | $E\{T0\}$ | 1,2 | 135 | 0,1784 |
| | | $E\{T1\}$ | 1,2 | 3,3 | 0,1884 |
| TETRA DL | 0,36 | $E\{T0\}$ | 3,578 | 6,71 | 0,1784 |
| | | $E\{T1\}$ | 3,515 | 2,624 | 0,1884 |
| GSM 900 UL | 0,02 | $E\{T0\}$ | 1,2 | 210,91 | 0,1784 |
| | | $E\{T1\}$ | 1,200 | 3,3 | 0,1884 |
| GSM 900 DL | 0,96 | $E\{T0\}$ | 3,578 | 1,1921 | 0,1784 |
| | | $E\{T1\}$ | 3,515 | 95,3 | 0,1884 |
| DCS 1800 UL | 0,02 | $E\{T0\}$ | 1,2 | 210,91 | 0,1784 |
| | | $E\{T1\}$ | 1,2 | 3,3 | 0,1884 |
| DCS 1800 DL | 0,44 | $E\{T0\}$ | 3,578 | 4 | 0,1784 |
| | | $E\{T1\}$ | 3,515 | 2,624 | 0,1884 |

Fonte: o autor.

4.3 Agrupamento de Canais

Com os modelos de tempo-frequência abordados nesta seção torna-se possível reproduzir a evolução no tempo e o padrão de ocupação de um grupo de canais pertencentes a uma determinada banda do espectro (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b). No caso específico deste trabalho, o interesse está nas bandas de tecnologia celular TETRA, GSM 900 e DCS 1800.

Através de dados empíricos é possível determinar que canais pertencentes a uma mesma banda podem ser considerados mutuamente independentes. Isso quer dizer que o padrão de ocupação de um canal não sofre influência de outros canais dentro da mesma faixa. Assim, o *duty cycle* (DC) de um grupo de canais pode ser modelado de forma independente, combinando os modelos de resolução temporal com os modelos do domínio frequência que serão abordados a seguir (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL; LÓPEZ-PÉREZ; VASILAKOS, 2011).

Duas características importantes devem ser consideradas no domínio frequência. A primeira é a probabilidade de distribuição dos valores de DC dentro da

mesma banda. A segunda trata da existência de grupos de canais contíguos e com valores de DC similares, chamada de *duty cycle clustering* ou *DC clustering*.

A probabilidade de distribuição dos valores de DC dentro da mesma banda pode ser obtida com a distribuição Beta (PAPOULIS, 2002) representada pela Equação 4.1.

Quando uma determinada banda apresenta canais contíguos com perfil de ocupação semelhante, podemos afirmar que o *duty cycle* possui *clusters* no domínio frequência (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b). O número de canais por *cluster* pode ser modelado como uma variável randômica distribuída geometricamente. Sua função de distribuição cumulativa (CDF, do inglês *Cumulative Density Function*) é dada pela Equação 4.7 (PAPOULIS, 2002).

$$F_{Geom}(k; p) = 1 - (1 - p)^k, k \in N^* = \{1, 2, 3, \dots\} \quad (4.7)$$

Onde k representa o número de canais do *cluster* e $1/p$ ($0 \leq p \leq 1$) é seu valor médio $E\{k\} = 1/p$.

Na Tabela 4.4 são apresentados valores levantados através de medições e que podem representar o tamanho dos DC *clusters* para as faixas de interesse do espectro (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL; LÓPEZ-PÉREZ; VASILAKOS, 2011).

Tabela 4.4 - Valores típicos do parâmetro p para determinação do tamanho do cluster.

| Banda | Parâmetro p |
|-------------|---------------|
| TETRA UL | 0,0752 |
| TETRA DL | 0,2857 |
| GSM 900 UL | 0,2011 |
| GSM 900 DL | 0,1322 |
| DCS 1800 UL | 0,3824 |
| DCS 1800 DL | 0,6096 |

Fonte: adaptado de López-Benítez, Casadevall, López-Pérez, Vasilakos (2011).

A análise do *DC clustering* fica facilitada quando definem-se *DC archetypes* que representam o tamanho médio do DC. Com relação à utilização, esses *archetypes* são classificados em muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. A Tabela 4.5 mostra os DCs *archetypes* utilizados nas simulações deste trabalho, de acordo com suas faixas de valores.

Tabela 4.5 - DC *archetypes*.

| DC <i>Archetype</i> | Intervalo do Duty Cycle | |
|---------------------|-------------------------|------|
| | De | Até |
| Muito baixo | 0 | 0,05 |
| Baixo | 0,05 | 0,4 |
| Médio | 0,4 | 0,6 |
| Alto | 0,6 | 0,95 |
| Muito alto | 0,95 | 1 |

Fonte: adaptado de López-Benítez, Casadevall (2011b).

Comparando os valores da Tabela 4.5 com a coluna *DC* (valor médio) da Tabela 4.1, obtém-se a seguinte classificação para as bandas de *downlink* (DL) e *uplink* (UL) utilizadas neste trabalho: TETRA UL (muito baixo), TETRA DL (baixo), GSM 900 UL (muito baixo), GSM 900 DL (muito alto), DCS 1800 UL (muito baixo) e DCS 1800 DL (médio).

4.4 Procedimento para Simulação de Espectro

A simulação de dados de ocupação de espectro é possível através da combinação das propriedades do domínio tempo e frequência (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL; LÓPEZ-PÉREZ; VASILAKOS, 2011). O algoritmo explicado a seguir permite a implementação de tais modelos em ferramentas de simulação (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL, 2011b). O mesmo foi utilizado no presente trabalho para gerar dados nas faixas TETRA, GSM 900 e DCS 1800 usando o programa MATLAB.

O procedimento de simulação está dividido em três etapas principais: geração dos valores de DC, atribuição dos valores de DC aos canais e geração de sequências de ocupação no domínio tempo. Os ciclos de livre e ocupado são gerados de forma sequencial para cada um dos canais do espectro de interesse. Estas etapas serão detalhadas nas seções 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3.

4.4.1 Geração de Valores de *Duty Cycle*

Os passos a seguir explicam como os valores de DC são gerados no domínio frequência.

Passo 1: Especificar o número de canais k na banda do espectro em questão.

Passo 2: Selecionar uma função de distribuição $F(\psi)$ para o DC (Beta ou Kumaraswamy), bem como os valores dos parâmetros da distribuição.

Passo 3: Com base na distribuição de probabilidade resultante do passo 2, gerar um conjunto de números randômicos definido por $\hat{\psi} = \{\hat{\psi}_1, \hat{\psi}_2, \dots, \hat{\psi}_c, \dots, \hat{\psi}_k\}$ de valores de DC a serem designados aos k canais da banda do espectro, onde $\hat{\psi}$ representa a saída desta etapa e $c = \{1, 2, \dots, k\}$.

4.4.2 Atribuição dos Valores de DC aos Canais

Nessa etapa, os valores de DC gerados anteriormente são atribuídos aos canais.

Passo 4: Definir um conjunto $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n, \dots, A_q\}$ de q DC *archetypes*, onde $n = \{1, 2, \dots, q\}$, juntamente com o conjunto correspondente $\Lambda = \{\Lambda_0, \Lambda_1, \dots, \Lambda_n, \dots, \Lambda_q\}$ de $q + 1$ limites de DC, onde $\Lambda_0 = 0$ e $\Lambda_n = 1$. Sendo que um DC $\hat{\psi}_c$ pertence ao *archetype* A_n se $\Lambda_{n-1} < \hat{\psi}_c \leq \Lambda_n$.

Passo 5: Com base na distribuição de probabilidade do passo 2, computar os elementos do conjunto $\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n, \dots, \Pi_q\}$ onde $\Pi_n = P(A_n) = P(\Lambda_{n-1} < \hat{\psi}_c \leq \Lambda_n) = F(\Lambda_n) - F(\Lambda_{n-1})$ representa a probabilidade de que o canal pertença ao *archetype* A_n .

Passo 6: Classificar os valores do conjunto $\hat{\psi}$ de acordo com os *archetypes* do conjunto A , baseado nos limites do conjunto Λ . Isto irá produzir q subconjuntos $\{\hat{\psi}_n\}_{n=1, \dots, q}$ (um por DC *archetype*) com $\eta_n = |\hat{\psi}_n|$ elementos cada, satisfazendo as condições $\cup_{n=1}^q \hat{\psi}_n = \hat{\psi}$ e $\cap_{n=1}^q \hat{\psi}_n = \emptyset$.

Passo 7: Selecionar um valor apropriado para o parâmetro p da distribuição geométrica que determinará o número de canais por *cluster*.

Passo 8: Igualar a zero os elementos de $\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_c, \dots, \Psi_k\}$, onde Ψ_c representa o valor do DC atribuído ao canal v_c . Igualar a zero os elementos do conjunto $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \dots, \alpha_q\}$, onde α_n representa um contador do número de canais pertencentes ao *archetype* A_n com um valor de DC atribuído. Definir o

contador $\alpha_c = \sum_{n=1}^q \alpha_n$ para o número total de canais com um valor de DC já atribuído. Repetir os passos a seguir até que $\alpha_n = \eta_n$ para todos n , ou seja, $\alpha_c = \sum_{n=1}^q \eta_n = k$:

Passo 8.1: Decidir o DC *archetype* $A' = A_n$ para o próximo *cluster* gerando uma variável uniformemente distribuída $U(0, 1)$ e comparando com as probabilidades do conjunto Π .

Passo 8.2: Se essa não é a primeira iteração do processo e o *archetype* A' resultante do passo 8.1 é do mesmo tipo que o *archetype* A'' do *cluster* gerado anteriormente, ou se o número dos canais por *archetype* $A' = A_n$ já foi atingido ($\alpha_n = \eta_n$), ir para o passo 8.1 e recomputar A' até que as condições $A' \neq A''$ e $\alpha_n < \eta_n$ sejam satisfeitas. A condição $A' \neq A''$ não é necessária quando existe um único DC *archetype* para o qual $\alpha_n < \eta_n$.

Passo 8.3: Decidir o número χ de canais que pertencem ao novo *cluster* do tipo $A' = A_n$ como um número randômico derivado da distribuição geométrica obtida no passo 7. Se $\alpha_n + \chi > \eta_n$, realizar a correção $\chi = \eta_n - \alpha_n$ para chegar ao número total de canais por *archetype*.

Passo 8.4: Selecionar aleatoriamente χ valores de DC do conjunto $\hat{\psi}_n$ (*archetype* A_n) que ainda não tenham sido atribuídos para formarem o subconjunto $\hat{\Psi}_n = \{\hat{\Psi}_1, \hat{\Psi}_2, \dots, \hat{\Psi}_\chi\} \subseteq \hat{\Psi}_n$. Acrescentar o subconjunto $\hat{\Psi}$ ao conjunto de valores DC já atribuídos, ou seja, $\{\hat{\Psi}_{\alpha_c+1}, \hat{\Psi}_{\alpha_c+2}, \dots, \hat{\Psi}_{\alpha_c+\chi}\} = \{\hat{\Psi}_1, \hat{\Psi}_2, \dots, \hat{\Psi}_\chi\} = \hat{\Psi}$.

Passo 8.5: Atualizar os contadores $\alpha_n = \alpha_n + \chi$ e $\alpha_c = \alpha_c + \chi$. Ir para o passo 8.1, até que todos os valores de DC do conjunto $\hat{\psi}$ sejam atribuídos aos canais do conjunto k .

4.4.3 Geração das Sequências de Ocupação no Domínio Tempo

Nessa etapa os valores de DC atribuídos aos canais nos passos anteriores são alocados no domínio tempo.

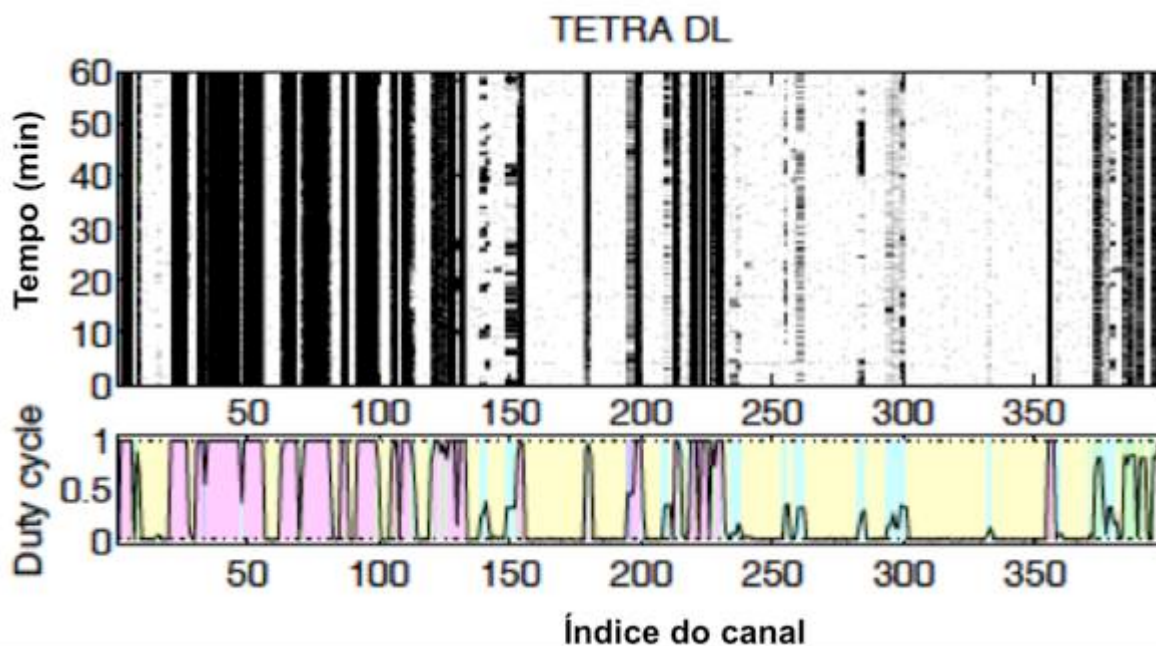
Passo 9: Selecionar distribuições apropriadas $F_0(T_0)$ e $F_1(T_1)$ para o tamanho T_0 dos períodos livre e T_1 para os períodos de ocupado, respectivamente.

Passo 10: Configure os parâmetros das distribuições selecionadas no passo 9, de tal forma que o DC médio dos canais seja coerente com os valores obtidos no passo 8, ou seja, $E\{T_1^c\}/(E\{T_0^c\} + E\{T_1^c\}) = \Psi_c$, onde $E\{T_0^c\}$ e $E\{T_1^c\}$ são as médias dos tamanhos dos períodos de livre e ocupado, respectivamente, para o c -ésimo canal, v_c .

Passo 11: Gere para cada canal uma sequência de períodos de livre/ocupado cujos tamanhos são derivados das distribuições propriamente configuradas $F_0(T_0)$ e $F_1(T_1)$. As sequências geradas para cada canal devem ser independentes entre si.

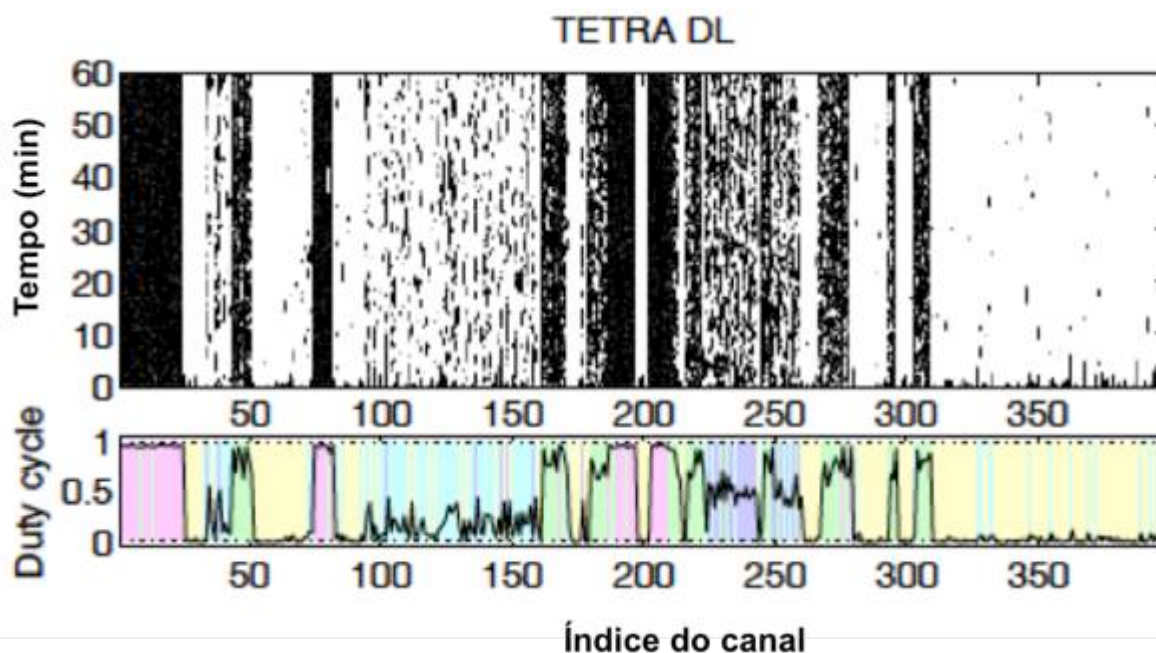
Nas figuras 4.3 e 4.4 é possível fazer a comparação entre os dados obtidos de forma empírica pelos autores (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL; LÓPEZ-PÉREZ; VASILAKOS, 2011), e os dados gerados de forma artificial pelo procedimento detalhado nesta seção. Ambos foram obtidos para a faixa TETRA DL. No gráfico tempo/frequência os pontos escuros indicam que o canal está ocupado.

Figura 4.3 - Dados obtidos através de medição para a faixa TETRA DL.



Fonte: adaptado de López-Benítez, Casadevall, López-Pérez e Vasilakos (2011).

Figura 4.4 - Dados obtidos através de simulação para a faixa TETRA DL.



Fonte: adaptado de López-Benítez, Casadevall, López-Pérez e Vasilakos (2011).

A inspeção visual e comparação das figuras 4.3 e 4.4 sugere que o procedimento proposto é capaz de reproduzir as propriedades estatísticas do espectro no domínio tempo e frequência. No entanto, para uma validação consistente, os autores fizeram uma verificação minuciosa dos dados gerados

artificialmente e das informações medidas. A conclusão foi que ambos têm as mesmas propriedades estatísticas em termos de DC médio por banda, distribuição de probabilidade para o DC dos canais, distribuição dos *clusters* de DC, distribuição de probabilidade para o tamanho dos períodos de livre/ocupado e propriedades de correlação de tempo (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL; LÓPEZ-PÉREZ; VASILAKOS, 2011).

5 Sistema Proposto

O presente trabalho propõe um método de alocação de canais em uma rede de rádios cognitivos (CRN) que utiliza uma base de dados de canais preditiva e adaptativa. A utilização de dados de predição permite priorizar a utilização de canais com baixa utilização no processo de alocação. A classificação dos canais é atualizada de forma dinâmica durante o processo de alocação, de acordo com as estatísticas de utilização dos canais, garantindo assim o caráter adaptativo do sistema. Diferentemente da IEEE 802.22, que foi concebida para utilização nas faixas de VHF e UHF em zonas rurais, o sistema aqui apresentado propõe a exploração de bandas licenciadas que também são utilizadas em zonas urbanas. Conforme mostrado no Capítulo 4, as bandas das tecnologias TETRA, GSM 900 e DCS 1800 também apresentam oportunidades de utilização em suas faixas de espectro. Assim, esses *spectrum holes* podem ser utilizados por usuários secundários (SUs), não só para acesso à internet, mas também para chamadas de voz.

Conforme visto no Capítulo 3, a IEEE 802.22 prevê a existência de um *Database Service* (DS) que armazena as informações de disponibilidade dos canais. A ideia de uma base de dados numa CRN também é abordada no artigo publicado por Vartiainen, Höyhty, Lehtomäki e Bräysy (2010). Nele, os autores propõem o uso de um banco de dados, com os canais classificados por prioridade. As prioridades variam conforme a disponibilidade dos canais, que estão organizados em três grupos: *free channels*, *occasionally free channels* e *occupied channels*. As informações são atualizadas conforme os resultados do *sensing* obtidos. Assim, a atualização da base de dados depende, essencialmente, da informação detectada através do *sensing*.

Em outro trabalho, na mesma linha, Höyhty, Vartiainen, Sarvanko e Mämmelä (2010) propõem um sistema utilizando duas bases de dados. Uma chamada *short term database* e outra definida como *long term database*. A primeira base serve para realizar a classificação e predição nas bandas de interesse. A segunda realiza a priorização dos canais com o intuito de reduzir o tempo de

sensing. Da mesma forma que no trabalho anterior, nesse caso a atualização da base de dados também depende da informação detectada no *sensing*.

Höyhty, Pollin e Mämmelä (2010) propõem, em seu artigo, uma técnica que classifica o tráfego dos canais de uma CRN em determinístico e/ou estocástico. Em seguida, diferentes regras de predição são aplicadas, de acordo com o tipo de usuário primário (PU) detectado. Dessa forma, identificam os canais com maior tempo livre para uso de usuários secundários (SU). Com o uso desta estratégia, os autores buscam uma melhora no desempenho do sistema, comparando com métodos que trabalham com a informação instantânea de ocupação do canal.

Uma das premissas da IEEE 802.22 é fornecer serviços de internet de alta velocidade. Por isso, conforme visto no Capítulo 3, as larguras de canal previstas para as WRANs variam de 6 a 8 MHz. No entanto, considerando as faixas do espectro abordadas nesse trabalho, entende-se que os canais de um modo geral, podem ser utilizados tanto para voz quanto para acesso de dados. No caso específico da tecnologia TETRA, que possui largura de canal de 25 kHz, pode-se priorizar a designação destes canais para chamadas de voz ou serviços que não demandem grandes taxas de transmissão. No artigo de Štern, Volk, Kandus, Javornik, Hrovat e Bešter (2008) é abordado o uso de serviços IP utilizando a tecnologia TETRA. No entanto, como nas bandas GSM e DCS a largura de canal é de 200 kHz (3GPP, 2013), os canais nesta faixa podem ser priorizados para aplicações que demandem taxas de transmissão maiores, de acordo com os requisitos de QoS. Adicionalmente, no sistema proposto, também é possível a alocação de mais de um canal, em caso de sequências de canais disponíveis nas bandas das três tecnologias abordadas. Isto possibilita a operação em faixas mais largas do espectro e, conseqüentemente, a utilização de taxas de transmissão ainda maiores que as proporcionadas pelo canal de 200 kHz.

Similar ao que é proposto na IEEE 802.22 e nos trabalhos citados acima, no sistema desenvolvido a presença de um *Database Service* (DS) tem papel importante. Ao gerar os dados de ocupação de espectro, conforme procedimento detalhado na Seção 4.4, tem-se um conjunto de dados com os ciclos de livre e ocupado dos canais, separados por tecnologia e faixas de *uplink* (UL) e *downlink* (DL). Assim, os canais das bandas TETRA UL, TETRA DL, GSM 900 UL, GSM 900 DL, DCS 1800 UL e DCS 1800 DL, são classificados de forma a priorizar os canais

com maior tempo livre. Posteriormente, a lista de canais classificados é carregada em uma base de dados para designação aos usuários secundários (SUs).

Com a classificação dos canais de acordo com sua disponibilidade, espera-se que a assertividade na designação dos mesmos aos SUs seja a maior possível. Em resumo, considerando uma situação de acerto, quando o SM/DS reservar um canal ou grupo de canais para um SU, a *spectrum sensing function* (SSF) irá realizar a detecção do canal e não encontrará usuário primário. Em função dos dados de disponibilidade dos canais no DS serem obtidos através de predição, e do comportamento dos usuários em uma rede celular ter uma componente aleatória, em alguns casos o SSF irá detectar a presença de usuário no canal. Quando isso ocorrer, um contador de falha será incrementado no DS, que será usado para calcular a probabilidade de sucesso deste canal. De forma semelhante, no cenário de acerto, um contador de sucesso será incrementado no DS para o canal em uso.

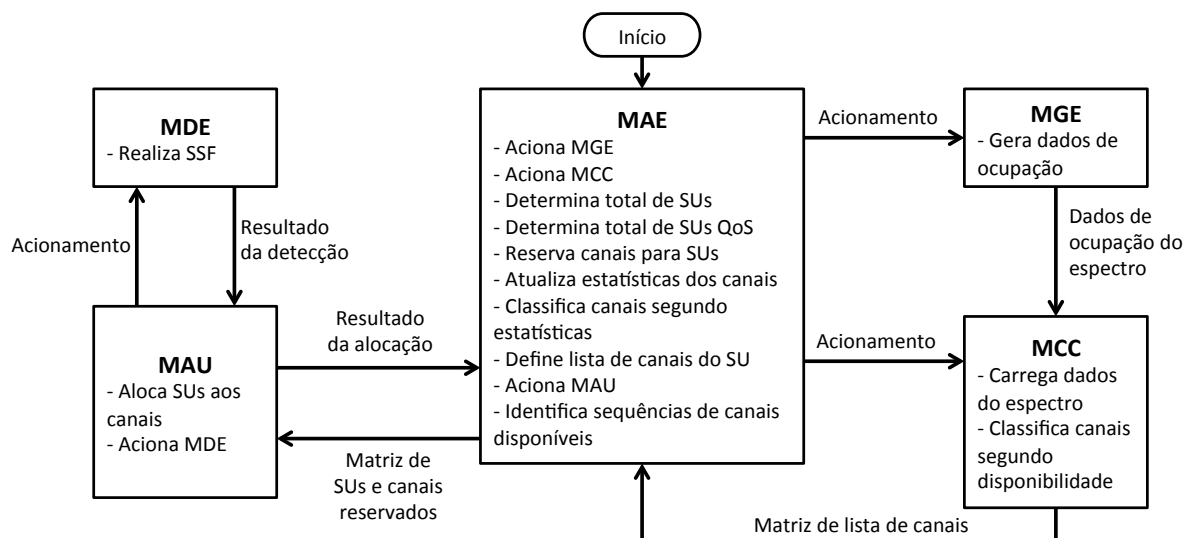
Conforme visto na Seção 3.2, a IEEE 802.22 também prevê que, quando a WRAN opera num cenário onde não há um DS disponível, a *Base Station* considera todos os canais inicialmente livres. Logo, a disponibilidade dos canais será definida durante a inicialização da rede e atualizada durante a operação da mesma. Fazendo uma analogia com o cenário proposto na IEEE 802.22 e, demonstrando o caráter adaptativo do sistema, é possível que o SM construa a lista de canais por conta própria em caso de indisponibilidade da base de dados. Assim, inicialmente o sistema considera todos os canais como livres. Conforme o SSF repassa o resultado do *sensing*, o SM atualiza a probabilidade de sucesso dos canais, até que uma lista dos canais com maior sucesso seja construída. Por ser construída com base em detecções instantâneas, esta lista de canais não leva em conta o histórico de ocupação dos mesmos. No entanto, garante autonomia ao SM em caso de indisponibilidade do DS.

O sistema desenvolvido é composto por cinco módulos responsáveis por desempenhar as funções do *Spectrum Manager* (SM), *Database Service* (DS) e *Spectrum Sensing Function* (SSF). Complementarmente às funções definidas na IEEE 802.22, foi desenvolvido um módulo responsável pela geração de dados de predição. Os módulos apresentam as seguintes denominações: Módulo de Geração de Espectro (MGE), Módulo de Classificação de Canais (MCC), Módulo de Alocação

de Usuários (MAU), Módulo de Detecção de Espectro (MDE) e Módulo de Administração de Espectro (MAE).

A Figura 5.1 apresenta o fluxo dos dados que trafegam pelo sistema, as funções de cada módulo, bem como o relacionamento entre os módulos. Os mesmos serão detalhados ao longo deste capítulo.

Figura 5.1 - Funções, entradas e saídas dos módulos do sistema proposto.



Fonte: o autor.

Para comprovação da efetividade do método proposto, no Capítulo 6 serão feitas comparações com técnicas que usam a detecção instantânea do canal.

5.1 Arquitetura Computacional

O sistema de simulação apresentado neste trabalho foi desenvolvido no programa MATLAB, versão R2012a. As simulações foram realizadas num microcomputador MacBook Air com processador Intel Core i7 de 1,8 GHz, 4 GB de memória RAM e sistema operacional versão OS X 10.9. Para representação das funções da CRN pertinentes a este trabalho, foram criados cinco módulos. Seus nomes e atribuições são descritos abaixo.

Módulo de Administração do Espectro (MAE): é o módulo principal, responsável pelo acionamento dos demais módulos do sistema e manutenção da lista de canais. Executa funções do *Spectrum Manager* (SM), além de ser responsável por manter o *Database Service* (DS) atualizado.

Módulo Gerador de Espectro (MGE): é o módulo responsável pela geração dos dados simulados de ocupação de espectro.

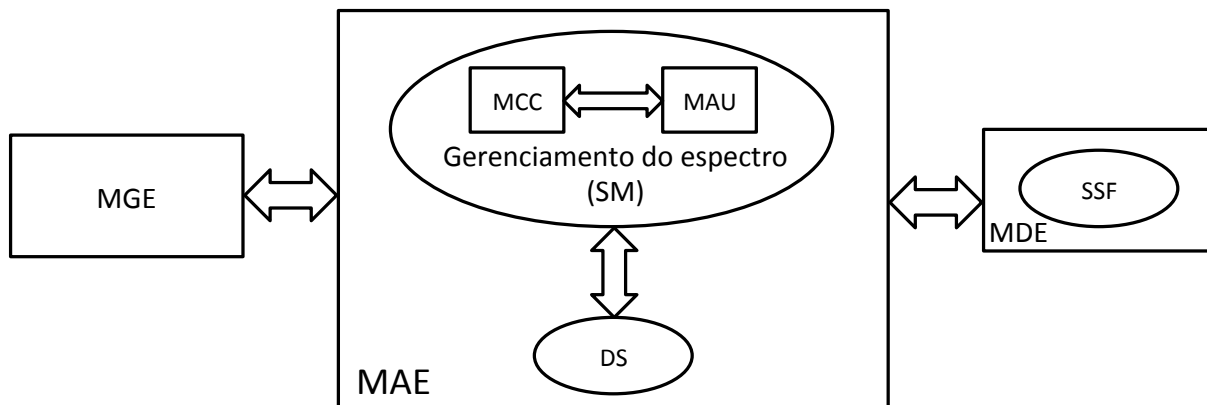
Módulo de Classificação de Canais (MCC): é o módulo responsável pela carga dos dados de utilização do espectro. Também é responsável pela classificação dos canais de acordo com sua disponibilidade. Na CRN, suas funções são executadas pelo SM.

Módulo de Alocação de Usuários (MAU): é responsável pela alocação dos usuários nos canais previamente selecionados. Suas funções são executadas pelo SM.

Módulo de Detecção do Espectro (MDE): módulo auxiliar, responsável por fornecer a ocupação instantânea do espectro. Na CRN, suas tarefas são executadas pela *Spectrum Sensing Function* (SSF).

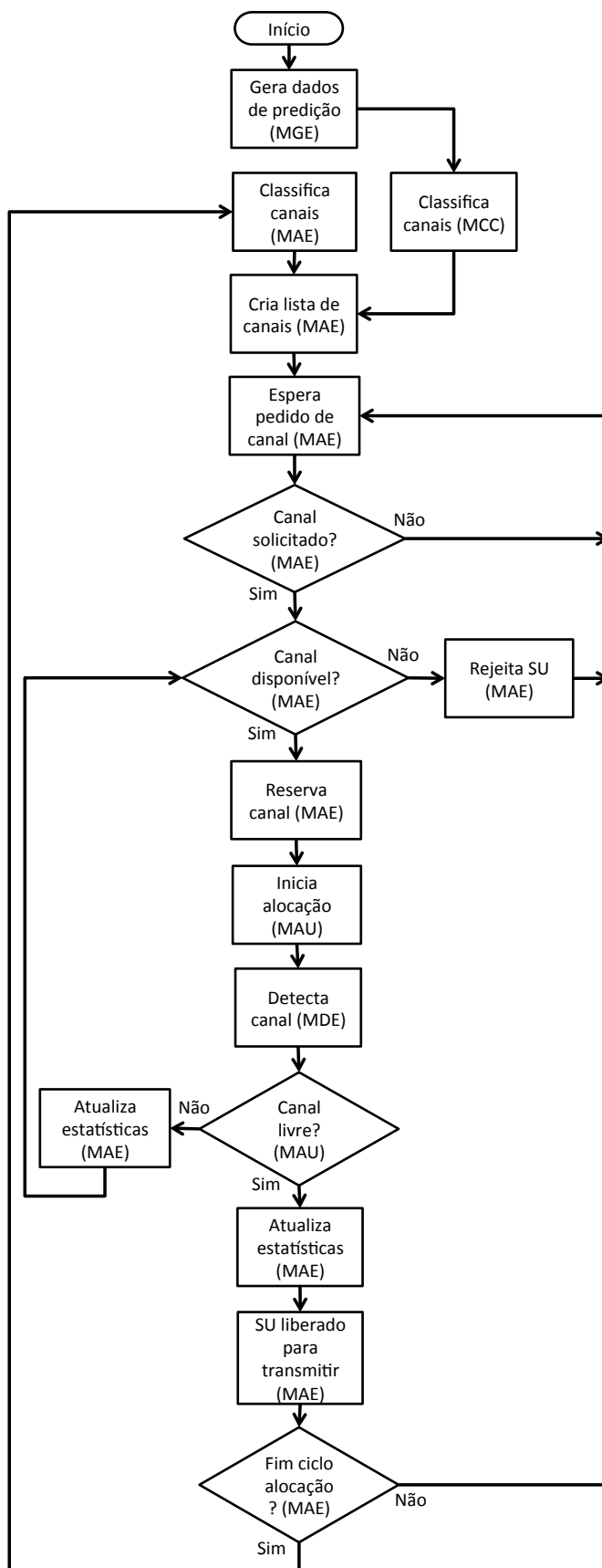
A Figura 5.2 mostra o relacionamento entre os módulos do sistema, bem como as funções do plano cognitivo associadas a estes módulos e definidas na IEEE 802.22. As definições da IEEE 802.22 são representadas por elipses e os módulos do sistema proposto estão em forma de retângulos. O módulo MGE não possui uma associação direta com as funções definidas na IEEE 802.22, pois este padrão não prevê a utilização de dados de predição no plano cognitivo. Por este motivo este módulo não está associado às funções do plano cognitivo na Figura 5.2. Na mesma figura, as setas representam a troca de informações entre os módulos do sistema e as funções do plano cognitivo. Estas informações serão detalhadas ao longo deste capítulo.

Figura 5.2 - Relacionamento entre os módulos do sistema e da IEEE 802.22.



O fluxograma da Figura 5.3 mostra o ciclo de alocação de canais executado em uma iteração do sistema, bem como a participação de cada módulo no processo. A indicação entre parênteses informa qual módulo é responsável pela execução da ação.

Figura 5.3 - Fluxograma do ciclo de alocação de canal.



Fonte: o autor.

5.2 Modo Preditivo

Através do procedimento detalhado na Seção 4.4, é possível gerar dados que simulam a ocupação do espectro nas bandas de *uplink* (UL) e *downlink* (DL) para as tecnologias TETRA, GSM 900 e DCS 1800. O modo preditivo, desempenhado pelo Módulo Gerador de Espectro (MGE), é responsável pela geração dos dados de predição.

Alguns parâmetros importantes precisam ser definidos antes da geração dos dados de predição. Primeiramente, o número de canais de cada tecnologia deve ser especificado. A Tabela 5.1 detalha essas informações e algumas outras referentes às bandas de interesse (LÓPEZ-BENÍTEZ; CASADEVALL; LÓPEZ-PÉREZ; VASILAKOS, 2011). Com base nesta tabela pode-se observar que o espectro de interesse compreende 1900 canais.

Tabela 5.1 - Informações das bandas utilizadas.

| Banda | Frequência Inicial (MHz) | Frequência Final (MHz) | Número de Canais (n) | Largura de Canal (kHz) |
|-------------|--------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| TETRA UL | 410 | 420 | 400 | 25 |
| TETRA DL | 420 | 430 | 400 | 25 |
| GSM 900 UL | 880 | 915 | 175 | 200 |
| GSM 900 DL | 925 | 960 | 175 | 200 |
| DCS 1800 UL | 1710 | 1785 | 375 | 200 |
| DCS 1800 DL | 1805 | 1880 | 375 | 200 |

Fonte: O autor.

Conforme visto no Capítulo 4, a distribuição Beta é utilizada para gerar os valores de *duty cycle* (DC) que serão associados aos canais. Os parâmetros de *shape* α e β para esta distribuição estão especificados na Tabela 4.1, para cada uma das bandas de interesse. Utilizando esses parâmetros na função *random* do MATLAB é possível obter os valores de DC desejados, que representam os dados de entrada para o sistema.

Outra definição importante para geração dos dados está relacionada a definição dos DC *clusters*. A Tabela 4.4 fornece os valores dos parâmetros p que determinarão o número de canais por *cluster*. Utilizando esses valores na distribuição geométrica da Equação 4.7, é possível determinar o tamanho dos

clusters para os 1900 canais de interesse. Além disso, os valores de DC obtidos com a distribuição Beta são classificados de tal forma que correspondam a uma das faixas dos *archetypes* da Tabela 4.5.

Para alocação do *duty cycle* (DC) no domínio tempo, usa-se a distribuição Pareto Generalizado (GP), aplicando os parâmetros especificados na Tabela 4.3. Os números aleatórios gerados segundo a distribuição GP são implementados através da função *gprnd* do MATLAB.

Com as definições descritas até aqui, já é possível gerar os dados simulados de utilização do espectro. O código detalhado da implementação desta etapa está disponível no Apêndice A. Porém, as funções do MGE podem ser resumidas nos seguintes passos:

- 1) Determinar o número de canais do espectro de interesse. Nesse caso, 1900 canais.

- 2) Utilizando a distribuição Beta, gerar valores de DC para todos os canais do espectro, de acordo as especificações na Tabela 4.1.

- 3) Classificar os valores de *duty cycle* gerados no passo 2 de acordo com os *archetypes* da Tabela 4.5.

- 4) Utilizando a distribuição geométrica da Equação 4.7, com o parâmetro p especificado na Tabela 4.4, gerar os valores que definirão o tamanho dos *clusters*.

- 5) Atribuir os valores de DC gerados no passo 2 para cada um dos canais do espectro, levando em conta a distribuição dos *archetypes* e *clusters* definidos nos passos 3 e 4.

- 6) Através da distribuição GP, utilizando como referência a Tabela 4.3, gerar a ocupação dos canais no domínio tempo.

Para distribuição dos valores de DC no domínio tempo, optou-se por gerar arquivos com dados correspondentes a uma hora. Dessa forma, a visualização dos gráficos de ocupação fica mais intuitiva, conforme pode ser comprovado na Figura 5.4.

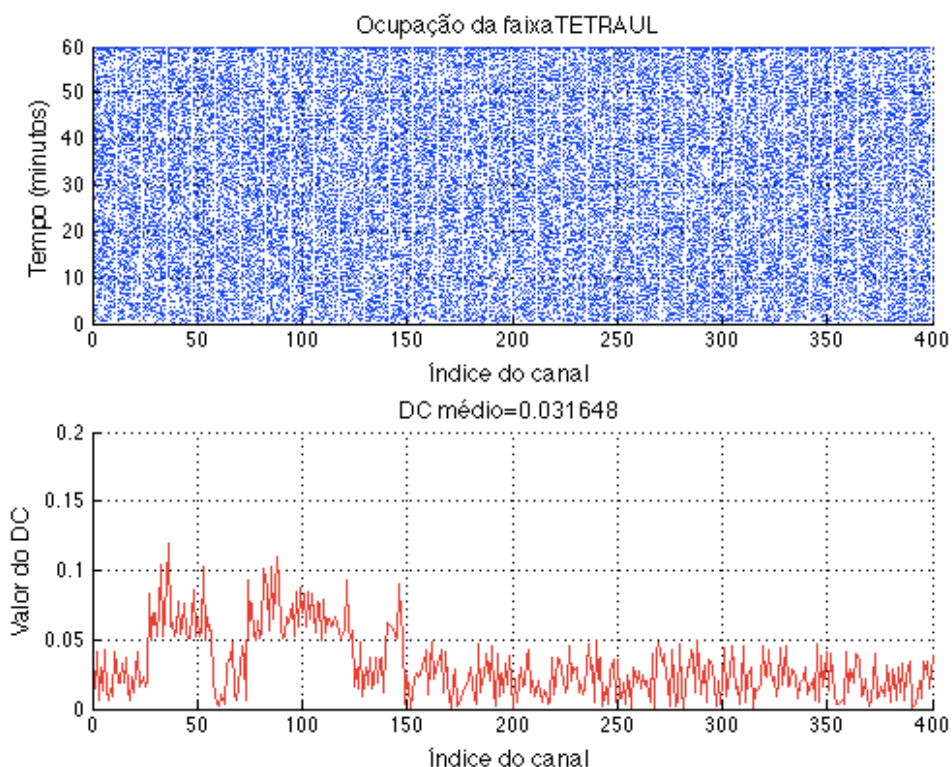
Para as simulações do sistema proposto, foram gerados dados que correspondam a um dia inteiro de ocupação do espectro. Logo, são gerados 24 arquivos com duração de 60 minutos e padrão de ocupação correspondente à banda

de interesse. No Apêndice B podem ser verificadas algumas amostras desses dados para as faixas utilizadas neste trabalho.

Na Figura 5.4 é possível verificar o resultado da geração de dados realizada pelo MGE nas faixas TETRA UL, TETRA DL, GSM 900 UL, GSM 900 DL, DCS 1800 UL e DCS 1800 DL, para um período de uma hora. Para cada caso, o gráfico superior indica a distribuição do DC, ou ciclos de ocupação do canal, no domínio tempo versus domínio frequência (índice do canal). Sendo que, cada ponto azul neste gráfico, representa um período de ocupação. No gráfico inferior é plotada a curva dos valores médios de DC para cada canal. Os DCs médios por banda devem ser aproximações dos valores especificados na Tabela 4.1, respeitando as faixas de valores para cada *archetype* especificado na Tabela 4.5.

Figura 5.4 - Dados simulados de ocupação de espectro.

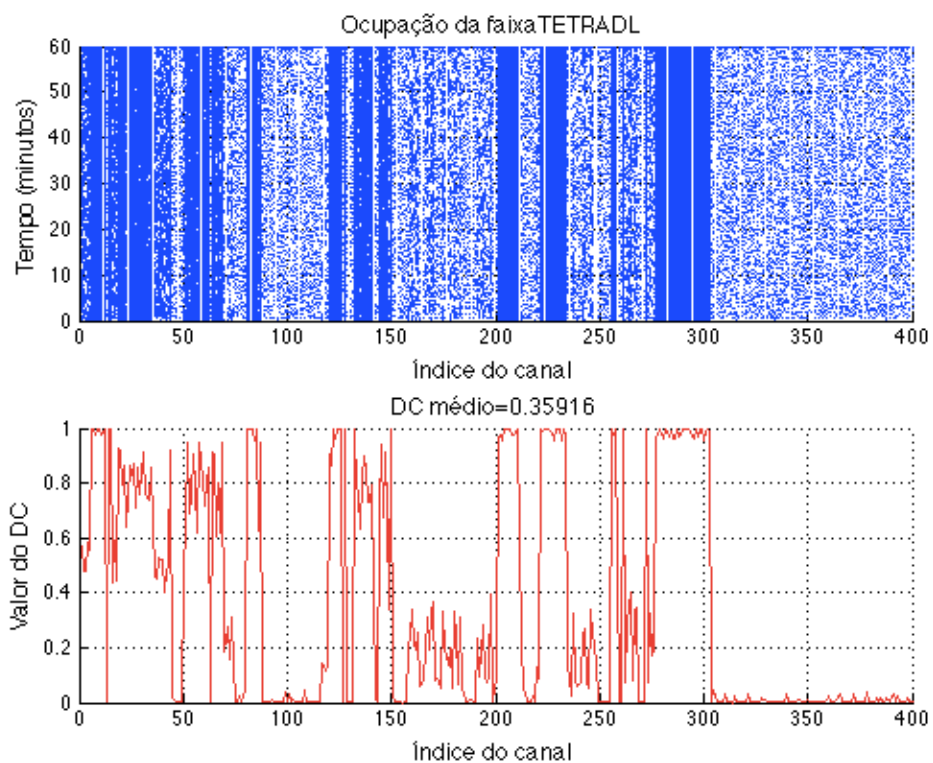
(a) Banda TETRA UL.



Pode-se observar na Figura 5.4a uma utilização muito baixa na faixa TETRA UL, segundo a Tabela 4.5, com DC médio igual a 0,031648.

Figura 5.4 - Dados simulados de ocupação de espectro.

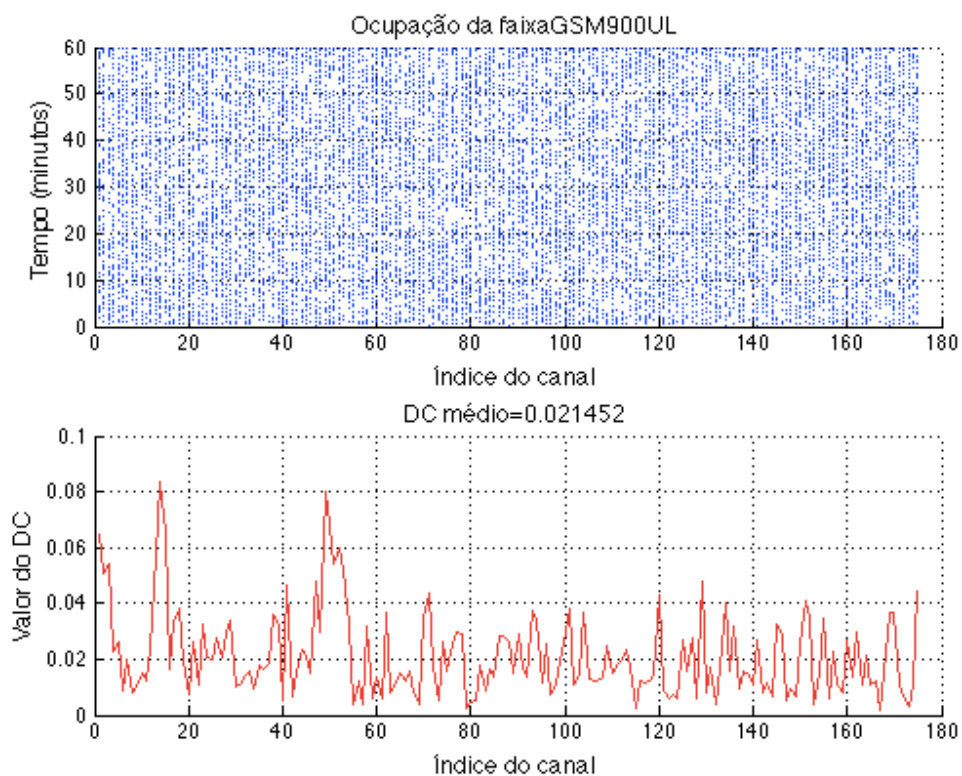
(b) Banda TETRA DL.



Na Figura 5.4b observa-se a formação de *clusters*, indicada pelas linhas azuis mais fortes), além de uma utilização baixa na banda TETRA DL, segundo a Tabela 4.5, com um DC médio de 0,35916. Esta figura pode ser comparada com a Figura 4.4, a qual é uma reprodução da figura gerada na simulação apresentada por López-Benítez, Casadevall, López-Pérez e Vasilakos (2011).

Figura 5.4 - Dados simulados de ocupação de espectro.

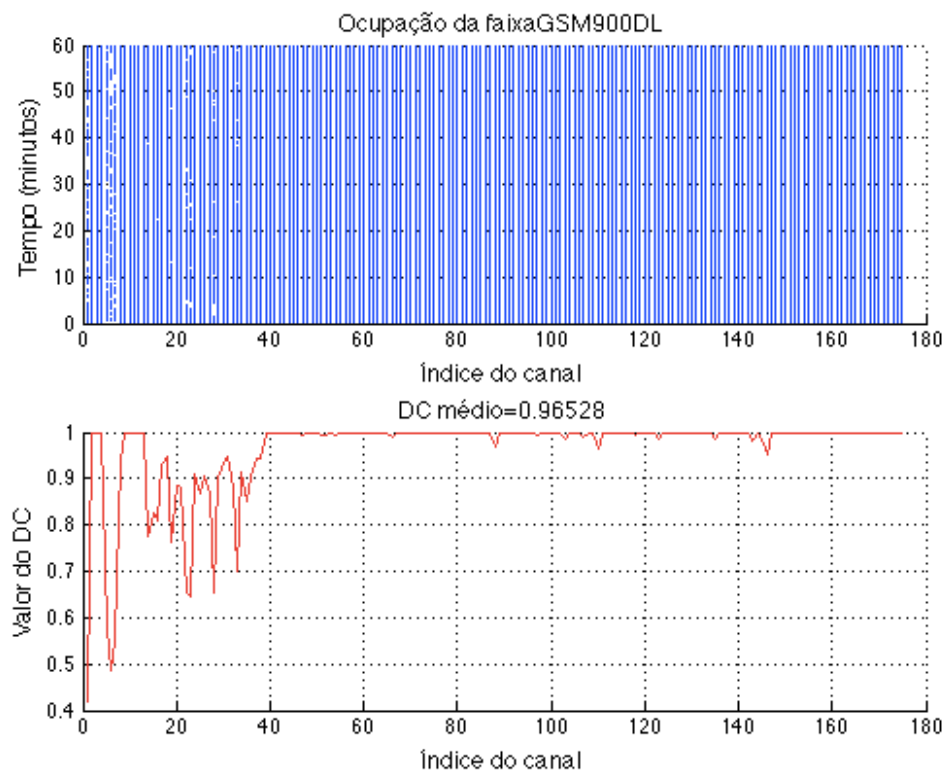
(c) Banda GSM 900 UL.



A Figura 5.4c mostra uma utilização muito baixa na faixa GSM 900 UL, segundo a Tabela 4.5, com DC médio igual a 0,021452.

Figura 5.4 - Dados simulados de ocupação de espectro.

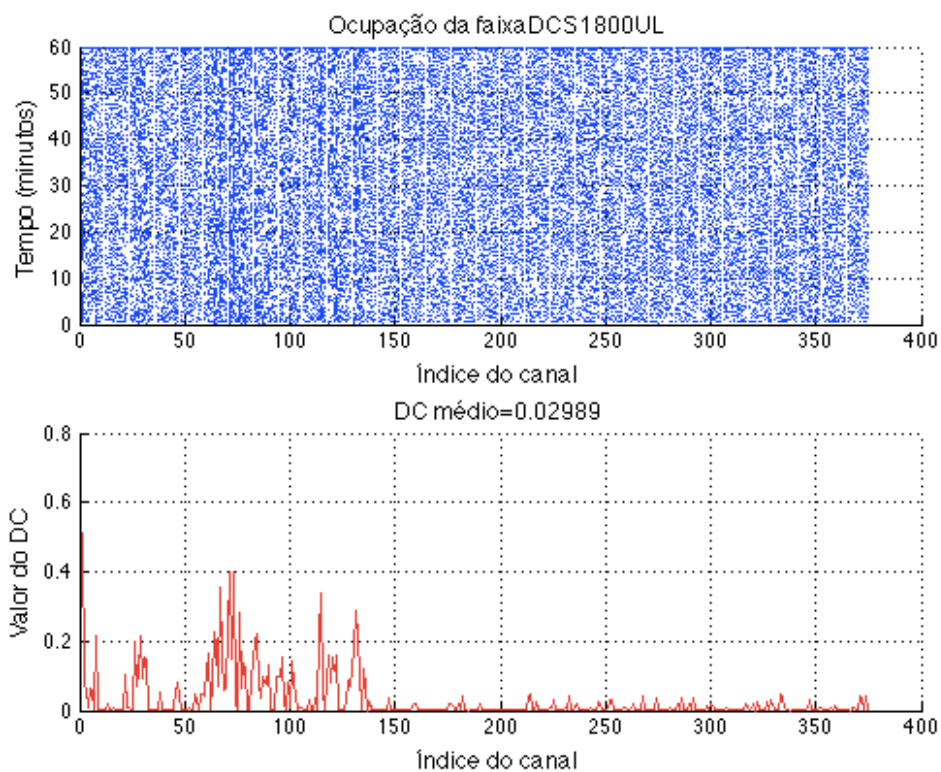
(d) Banda GSM 900 DL.



A Figura 5.4d mostra uma utilização muito alta na faixa GSM 900 DL, segundo a Tabela 4.5, com um DC médio de 0,96528.

Figura 5.4 - Dados simulados de ocupação de espectro.

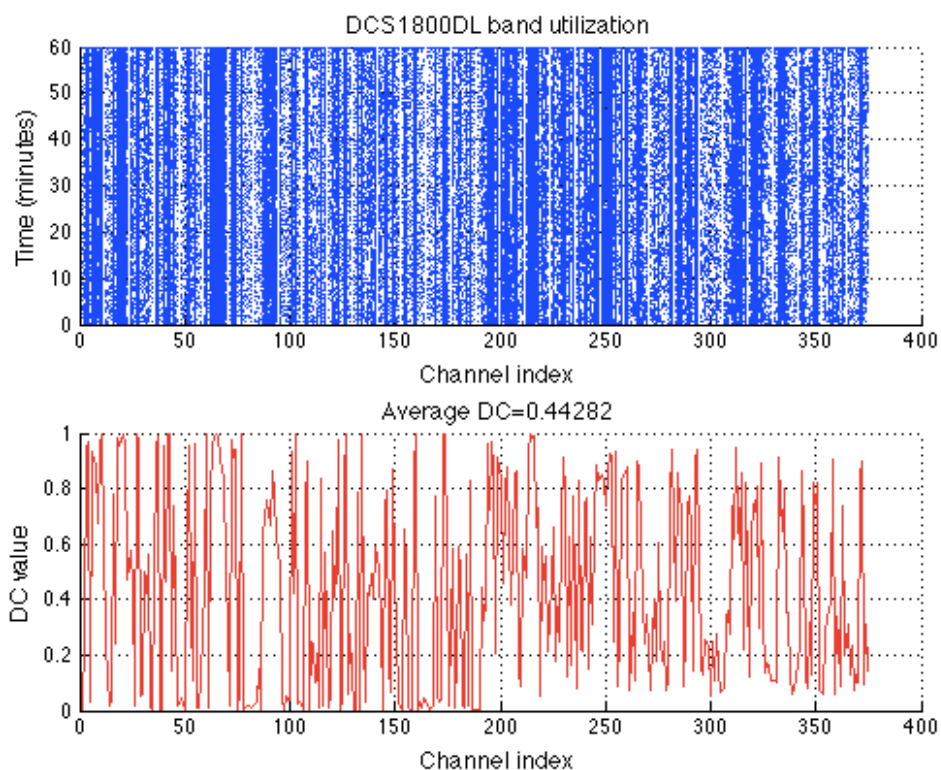
(e) Banda DCS 1800 UL.



A Figura 5.4e mostra uma utilização muito baixa na faixa DCS 1800 UL, segundo a Tabela 4.5, com um DC médio de 0,02989.

Figura 5.4 - Dados simulados de ocupação de espectro.

(f) Banda DCS 1800 DL.



Fonte: o autor

A Figura 5.4f mostra uma ocupação média na banda DCS 1800 DL, segundo a Tabela 4.5, com um DC médio de 0,44282.

Analisando os DCs médios apresentados nas figuras de 5.4a até 5.4f, pode-se notar a baixa utilização nas faixas GSM 900 UL, TETRA UL e DCS 1800 UL, caracterizando uma boa oportunidade para o uso de tecnologias de acesso oportunístico ao espectro. Já na faixa GSM 900 DL, é possível notar a alta utilização e a presença de poucos *white spaces*.

É importante mencionar que, os parâmetros utilizados para configuração do algoritmo detalhado na Seção 4.4, foram especificados com base em dados de medições realizadas por López-Benítez, Casadevall, López-Pérez e Vasilakos (2011). Dessa forma, mesmo que as bandas de interesse sejam as mesmas em vários países, a representação específica do tráfego de determinada região, deve sempre ser confrontada com dados de medição. Ainda assim, independentemente

do local, o procedimento da Seção 4.4 e os parâmetros utilizados são considerados válidos no contexto deste trabalho.

5.3 Construção da Lista de Canais

A carga e classificação dos dados de espectro gerados pelo Módulo Gerador de Espectro (MGE) são realizados pelo Módulo de Classificação de Canais (MCC). A descrição do MCC, bem como seu relacionamento com os demais módulos do sistema serão detalhadas nesta seção.

Os dados gerados pelo MGE são disponibilizados em forma de arquivo, onde cada hora é representada por um arquivo. Assim, para carga de dados referentes a um dia inteiro em determinada faixa do espectro, são necessários 24 arquivos.

O arquivo de dados possui formato de uma matriz onde as colunas representam o índice dos canais e as linhas indicam o domínio tempo. Os índices dos canais para cada banda são especificados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Índice dos canais para cada banda.

| Banda | Índice inicial | Índice final | Número de canais (n) |
|-------------|----------------|--------------|----------------------|
| TETRA UL | 1 | 400 | 400 |
| TETRA DL | 401 | 800 | 400 |
| GSM 900 UL | 801 | 975 | 175 |
| GSM 900 DL | 976 | 1150 | 175 |
| DCS 1800 UL | 1151 | 1525 | 375 |
| DCS 1800 DL | 1526 | 1900 | 375 |

Fonte: o autor.

No domínio tempo, para cada canal, 120 valores correspondem aos ciclos de livre e ocupado de cada canal, ao longo de 60 minutos. O primeiro valor é sempre o do ciclo livre e, conseqüentemente, o segundo equivale ao tamanho do ciclo de ocupado. A soma dos dois ciclos deve ser sempre igual a 1.

Na Figura 5.5 é possível verificar parte do conteúdo de um arquivo de dados pertencente à faixa DCS 1800 DL. O formato da matriz é mostrado na parte superior que, nesse caso, apresenta 120 linhas por 375 colunas. O valor 120 equivale ao

período de uma hora, com dois ciclos por minuto. O valor 375 está de acordo com a Tabela 5.2 para esta faixa do espectro.

Figura 5.5 - Exemplo de arquivo da faixa DCS 1800 DL.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| 1 | 0.9465 | 0.9439 | 0.9857 | 0.5351 | 0.1170 | 0.0055 |
| 2 | 0.0535 | 0.0561 | 0.0143 | 0.4649 | 0.8830 | 0.9945 3.7 |
| 3 | 0.9720 | 0.8862 | 0.9885 | 0.4223 | 0.4720 | 0.0109 |
| 4 | 0.0280 | 0.1138 | 0.0115 | 0.5777 | 0.5280 | 0.9891 |
| 5 | 0.9244 | 0.8837 | 0.9796 | 0.3156 | 0.2218 | 0.0046 |
| 6 | 0.0756 | 0.1163 | 0.0204 | 0.6844 | 0.7782 | 0.9954 |
| 7 | 0.9655 | 0.9070 | 0.9826 | 0.5783 | 0.1077 | 0.0123 |
| 8 | 0.0345 | 0.0930 | 0.0174 | 0.4217 | 0.8923 | 0.9877 |
| 9 | 0.9808 | 0.9472 | 0.9873 | 0.7870 | 0.1895 | 0.0054 |
| 10 | 0.0192 | 0.0528 | 0.0127 | 0.2130 | 0.8105 | 0.9946 4.8 |
| 11 | 0.9792 | 0.9769 | 0.9762 | 0.7586 | 0.1950 | 0.0064 |
| 12 | 0.0208 | 0.0231 | 0.0238 | 0.2414 | 0.8050 | 0.0930 |
| 13 | 0.9329 | 0.9528 | 0.9835 | 0.3941 | 0.4327 | 0.0122 |
| 14 | 0.0671 | 0.0472 | 0.0165 | 0.6059 | 0.5673 | 0.9878 |
| 15 | 0.9256 | 0.9650 | 0.9898 | 0.6375 | 0.3155 | 0.0072 |
| 16 | 0.0744 | 0.0350 | 0.0102 | 0.3625 | 0.6845 | 0.9928 |
| 17 | 0.9468 | 0.9599 | 0.9787 | 0.3912 | 0.1544 | 0.0105 |
| 18 | 0.0532 | 0.0401 | 0.0213 | 0.6088 | 0.8456 | 0.9895 |
| 19 | 0.0262 | 0.0570 | 0.0860 | 0.7404 | 0.2770 | 0.0035 |

Fonte: o autor.

Na mesma figura, tomando-se como amostra de exemplo o canal 4 (coluna 4), no minuto 5 (linhas 9 e 10), pode-se observar os valores 0,7870 para o ciclo livre, e 0,2130 para o ciclo de ocupado. Assim, pode-se dizer que o *duty cycle* (DC) para o canal 4 no minuto 5 é de 0,2130.

Portanto, o MCC irá carregar os arquivos equivalentes a um dia inteiro, para todas as bandas de interesse. Após a carga dos dados, tem-se uma matriz do espectro com a ocupação dos 1900 canais de interesse, ao longo de 24 horas. Logo, o formato desta matriz será de 1900 colunas representando os canais, por 2880 linhas representando os ciclos de livre/ocupado em cada minuto, para um período de 24 horas.

Depois de criar a matriz do espectro o MCC realiza a classificação dos canais de acordo com seu ciclo livre. Assim, para cada período de uma hora, o módulo ordena os canais com maior tempo livre, classificando-os em ordem decrescente. Dessa forma, cria-se uma matriz de lista de canais com 24 linhas representando cada hora do dia. O número de colunas desta matriz corresponde ao tamanho do espectro útil.

O espectro útil nada mais é que o número de canais considerados para uso em acesso oportunístico. Seu número máximo não pode ultrapassar o total de canais do espectro, que neste trabalho é de 1900. Entretanto, quando se considera todos os canais como espectro útil, também estão incluídas nesta matriz faixas congestionadas e com poucas oportunidades como, por exemplo, o GSM 900 DL. No Capítulo 7 alguns resultados vão demonstrar que, em certos cenários, torna-se conveniente definir o espectro útil como um percentual do espectro de 1900 canais.

A Figura 5.6 mostra um exemplo de matriz de lista de canais, considerando um espectro útil de 20% do espectro total, ou seja, 380 canais. Nesta figura é possível observar a lista dos canais melhores classificados ao longo do dia. Em destaque aparece a lista para o período compreendido entre 16h e 17h. Assim, neste horário, estes são os canais com maior tempo livre. Estes canais operam nas bandas especificadas na Tabela 5.2, de acordo com seus índices. Logo, o canal 1387 pertence à banda DCS 1800 UL, o canal 689 pertence à TETRA DL, e assim por diante.

Figura 5.6 - Exemplo de matriz de lista de canais.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|---|
| 1 | 1206 | 686 | 1514 | 1404 | 503 | 765 | 1335 | 1 |
| 2 | 757 | 1154 | 1773 | 1514 | 629 | 1311 | 1524 | 1 |
| 3 | 1297 | 1469 | 760 | 1353 | 362 | 1486 | 1484 | 1 |
| 4 | 562 | 560 | 709 | 1183 | 1449 | 644 | 1457 | 1 |
| 5 | 1456 | 1491 | 1377 | 1317 | 1401 | 696 | 1289 | 1 |
| 6 | 492 | 1451 | 753 | 1463 | 1433 | 414 | 458 | 1 |
| 7 | 1210 | 1368 | 1448 | 784 | 1208 | 1227 | 1193 | 1 |
| 8 | 1268 | 1349 | 1464 | 1426 | 1497 | 798 | 1336 | 1 |
| 9 | 1184 | 1330 | 328 | 1509 | 731 | 1505 | 1273 | 1 |
| 10 | 1394 | 1440 | 767 | 1679 | 749 | 796 | 1350 | 1 |
| 11 | 1434 | 710 | 760 | 294 | 1482 | 1363 | 1330 | 1 |
| 12 | 1639 | 781 | 729 | 1202 | 685 | 761 | 1506 | 1 |
| 13 | 1435 | 1171 | 1484 | 1211 | 1219 | 1227 | 1240 | 1 |
| 14 | 1348 | 795 | 1414 | 606 | 624 | 1471 | 1441 | 1 |
| 15 | 1347 | 1764 | 1275 | 1345 | 1400 | 1346 | 1484 | 1 |
| 16 | 1432 | 748 | 1353 | 1296 | 1460 | 1398 | 1295 | 1 |
| 17 | 1387 | 689 | 788 | 1519 | 750 | 1219 | 1334 | 1 |
| 18 | 1327 | 1219 | 1740 | 1366 | 1421 | 1469 | 1490 | 1 |
| 19 | 773 | 1524 | 1304 | 1311 | 706 | 1523 | 788 | 1 |
| 20 | 626 | 767 | 1217 | 1311 | 715 | 458 | 782 | 1 |
| 21 | 86 | 119 | 1318 | 1368 | 1390 | 1771 | 1459 | 1 |
| 22 | 1307 | 791 | 800 | 1413 | 1433 | 1329 | 1378 | 1 |
| 23 | 578 | 1548 | 1210 | 1508 | 1431 | 1391 | 1449 | 1 |
| 24 | 783 | 1309 | 727 | 1249 | 1355 | 1460 | 1307 | 1 |
| 25 | | | | | | | | |

Fonte: o autor.

Assim, a matriz de lista de canais é disponibilizada pela MCC ao módulo responsável pelo gerenciamento do espectro (MAE, Módulo de Administração do

Espectro), que irá fazer a alocação dos canais aos usuários secundários (SUs). O código que implementa o MCC está disponível no Apêndice C.

5.4 Alocação de Canais

Conforme visto na Seção 5.1, o Módulo de Administração do Espectro (MAE) é responsável pelo gerenciamento dos canais, executando as funções do *Spectrum Manager* (SM). Portanto, quando este módulo recebe a matriz de lista de canais do Módulo de Classificação de Canais (MCC), o Módulo de Alocação de Usuários (MAU) é acionado para realizar a alocação dos canais aos usuários.

O MAU recebe um vetor do MAE que contém os canais do espectro útil, ordenados por disponibilidade. A primeira ação deste módulo é criar uma base de dados de canais, na mesma ordem do vetor recebido. A base de dados de canais é formada pelos seguintes campos:

Índice do canal: número do canal no espectro, considerando o intervalo de 1 a 1900.

Situação do canal: indica se o canal está reservado (valor um) ou livre (valor zero).

Contador de sucessos: indica quantas vezes o canal foi utilizado com sucesso.

Contador de falhas: indica quantas vezes houve falha na utilização do canal. Em outras palavras, significa que a SSF detectou um usuário no canal quando tentou alocá-lo para o usuário atual.

Número do usuário: indica o número do usuário secundário que está utilizando o canal no momento.

A Figura 5.7 mostra um exemplo do conteúdo da base de dados de canais. Nela pode-se notar que o tamanho do espectro útil é de 380 canais. Tomando-se o canal 158 (linha 5) como exemplo, pode-se observar que ele está reservado, com um sucesso na alocação e nenhuma falha, e que está ocupado pelo usuário 5.

Figura 5.7 - Conteúdo de base de dados de canais.

| Channel_db <380x5 double> | | | | | |
|---------------------------|-----|---|---|---|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 20 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 37 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| 3 | 104 | 1 | 1 | 0 | 3 |
| 4 | 114 | 1 | 1 | 0 | 4 |
| 5 | 158 | 1 | 1 | 0 | 5 |
| 6 | 264 | 1 | 1 | 0 | 6 |
| 7 | 349 | 1 | 1 | 0 | 7 |
| 8 | 361 | 1 | 1 | 0 | 8 |
| 9 | 393 | 1 | 1 | 0 | 9 |
| 10 | 538 | 1 | 1 | 0 | 10 |
| 11 | 646 | 1 | 1 | 0 | 11 |
| 12 | 647 | 1 | 1 | 0 | 12 |

Número de canais = 380 (espectro útil)

Canal = 158
Situação = reservado
Sucessos = 1
Falhas = 0
Usuário alocado = 5

Fonte: o autor.

Para controle da alocação de canais, o MAU também precisa criar uma tabela de usuários. Conforme mencionado no início do Capítulo 6, este trabalho prevê também a criação de uma lista individual de canais para cada usuário, de acordo a disponibilidade do espectro.

A Figura 5.8 mostra um exemplo de tabela de usuários, onde foi possível criar listas de 3 canais por usuário para um total de 100 usuários. No exemplo do usuário 4 (linha 4), os canais 114, 35 e 645 fazem parte de sua lista e, portanto, são atualizados para o estado reservado na base de dados de canais.

Figura 5.8 - Exemplo de tabela de usuários.

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|-----|----|------|---|
| 1 | 20 | 23 | 1456 | |
| 2 | 37 | 31 | 615 | |
| 3 | 104 | 33 | 616 | |
| 4 | 114 | 35 | 645 | |
| 5 | 158 | 36 | 655 | |
| 6 | 264 | 40 | 656 | |
| 7 | 349 | 54 | 658 | |
| 8 | 361 | 56 | 659 | |
| 9 | 393 | 62 | 662 | |
| 10 | 538 | 68 | 664 | |
| 11 | 646 | 71 | 666 | |
| 12 | 647 | 75 | 699 | |

Fonte: o autor.

Para que o usuário possa efetivamente transmitir no canal é necessário que este seja observado para confirmar se realmente está livre. Conforme visto na Seção 3.3, a detecção do espectro é realizada pela SSF (*Spectrum Sensing Function*). No sistema proposto a SSF é realizada pelo Módulo de Detecção de Espectro (MDE). Assim, para cada usuário, o MAU deve solicitar ao MDE que realize o *sensing* do canal. Esta solicitação pode ser para o SSF do dispositivo do usuário ou para o SSF da estação rádio-base. Na Seção 5.1.4 as funções do MDE serão melhor detalhadas. O código do MAU está disponível no Apêndice D.

5.5 Detecção do Espectro

Conforme mencionado no início do Capítulo 6, apesar das técnicas de detecção de espectro (*spectrum sensing*) não estarem no escopo deste trabalho, é preciso que a existência do SSF seja simulada para indicar ou não a presença de usuário no canal. Dessa forma, o Módulo de Detecção de Espectro (MDE) foi desenvolvido para desempenhar esta função.

A simulação de detecção do espectro é realizada através do mesmo algoritmo detalhado na Seção 4.4 e implementado no Módulo Gerador de Espectro (MGE). Entretanto, diferentemente do modo como é usado no MGE, onde os dados

gerados apresentam 60 ciclos de livre/ocupado, no MDE é gerado apenas um ciclo de livre/ocupado para cada canal, valor que representa um minuto.

A Figura 5.9 apresenta parte de uma matriz gerada pelo MDE na banda GSM 900 DL, onde a soma dos valores do ciclo livre e ocupado deve ser igual a 1. Na parte superior é possível verificar o número de ciclos gerados que, nesse cenário de simulação da SSF, será sempre 2. A título de comparação, a Figura 5.5 representa o mesmo formato de dados, porém para 60 ciclos.

Figura 5.9 - Simulação de dados instantâneos na banda GSM 900 DL.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 3.0739e-05 | 0.0022 | 0.0021 | 0.0284 | 0.0015 | 5.9338 |
| 2 | 1.0000 | 0.9978 | 0.9979 | 0.9716 | 0.9985 | 0.9716 |

2 = 1 ciclo livre + 1 ciclo ocupado

Canal 3:
Ciclo livre = 0,0021
Ciclo ocupado = 0,9979

Fonte: o autor.

Os valores "detectados" são convertidos para a hora instantânea usando uma representação em segundos, a fim de reproduzir a ocupação no instante da detecção. Esta conversão utiliza as seguintes relações:

$$\text{Instante da detecção} = \text{hora} \cdot 3600 + \text{minutos} \cdot 60 + \text{segundos}$$

$$\text{ciclo livre} = \text{hora} \cdot 3600 + \text{minutos} \cdot 60 + 60 \cdot (\text{ciclo livre})$$

$$\text{ciclo ocupado} = \text{hora} \cdot 3600 + \text{minutos} \cdot 60 + 60 \cdot (\text{ciclo ocupado})$$

Os valores dos ciclos livre/ocupado obtidos nas conversões acima representam o término dos respectivos intervalos. Ainda, o valor do ciclo ocupado deve ser somado ao do ciclo livre para se obter o final de seu período. Assim, o fim do ciclo ocupado será sempre igual ao final do intervalo de tempo. De forma semelhante, o início do ciclo livre será sempre igual ao início do intervalo de tempo.

Considere o canal 4 da Figura 5.5 no instante da detecção 12 h 24 min 25 s. Os ciclos livre e ocupado são, respectivamente, 0,7820 e 0,2130. Nesse exemplo, obtém-se os seguintes valores:

$$\text{Instante da detecção} = 12 \cdot 3600 + 24 \cdot 60 + 25 = 44665 \text{ s}$$

$$\text{Ciclo livre} = 12 \cdot 3600 + 60 \cdot 24 + 60 \cdot 0,7820 = 44687 \text{ s}$$

$$\text{Ciclo ocupado} = 12 \cdot 3600 + 60 \cdot 24 + 60 \cdot (0,2130 + 0,7820) = 44700 \text{ s}$$

Logo, para o canal 4 temos os seguintes intervalos:

Intervalo de tempo: de 44640 s até 44700 s (60 s)

Intervalo do ciclo livre: de 44640 s até 44687 s (47 s)

Intervalo do ciclo ocupado: de 44688 s até 44700 s (13 s)

Assim, como nesse caso o instante da detecção está dentro do intervalo de ciclo livre, o canal é considerado disponível.

Já para o caso do canal 3 da Figura 5.9, considerando a mesma hora de detecção, a ocupação instantânea deste canal é representada da seguinte forma:

$$\text{Instante da detecção} = 12 \cdot 3600 + 24 \cdot 60 + 25 = 44665 \text{ s}$$

$$\text{Ciclo livre} = 12 \cdot 3600 + 60 \cdot 24 + 60 \cdot 0,0021 = 44640 \text{ s}$$

$$\text{Ciclo ocupado} = 12 \cdot 3600 + 60 \cdot 24 + 60 \cdot (0,0021 + 0,9979) = 44700 \text{ s}$$

Nesse exemplo, o ciclo de livre é extremamente pequeno (0,0021). Assim, por praticidade, pode ser arredondado para zero. Já o ciclo ocupado tem duração de praticamente 60 segundos (0,9979). Logo, os intervalos ficam da seguinte forma:

Intervalo de tempo: de 44640 s até 44700 s (60 s)

Intervalo do ciclo livre: de 44640 s até 44640 s (menos de 1 s)

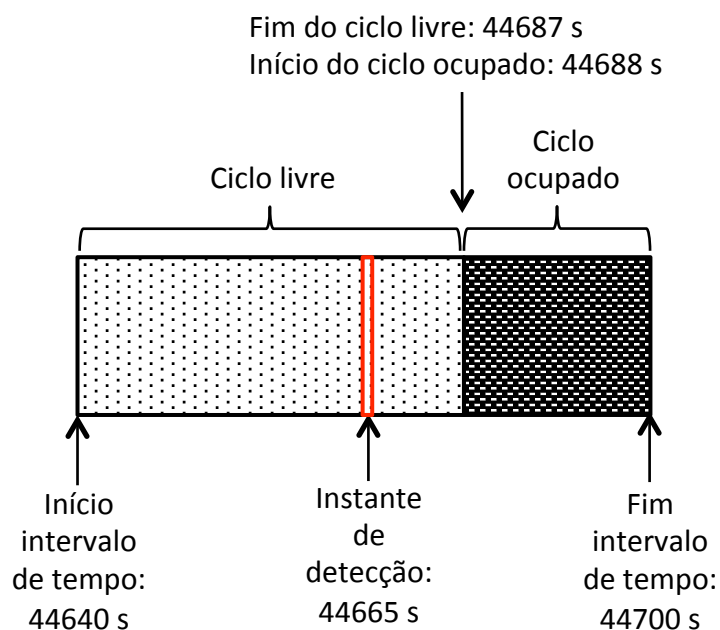
Intervalo do ciclo ocupado: de 44640 s até 44700 s (aproximadamente 60 s)

Como a hora local está dentro do intervalo do ciclo ocupado, este canal é considerado ocupado.

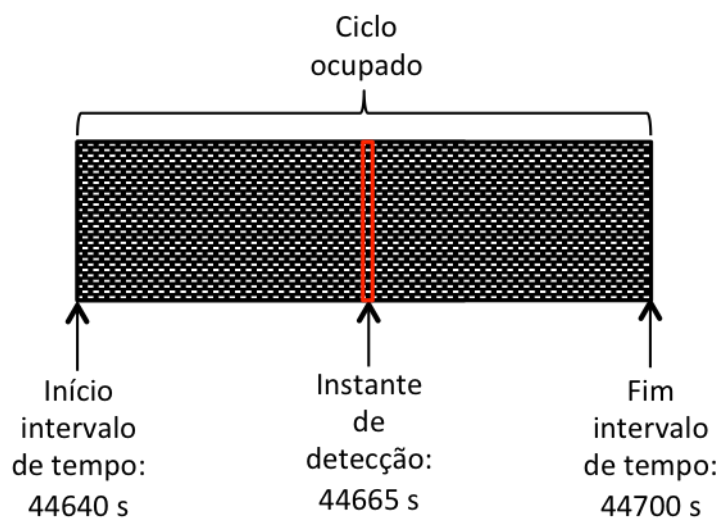
A Figura 5.10 ilustra os dois exemplos aqui abordados.

Figura 5.10 - Simulação de detecção do canal.

(a) Canal livre.



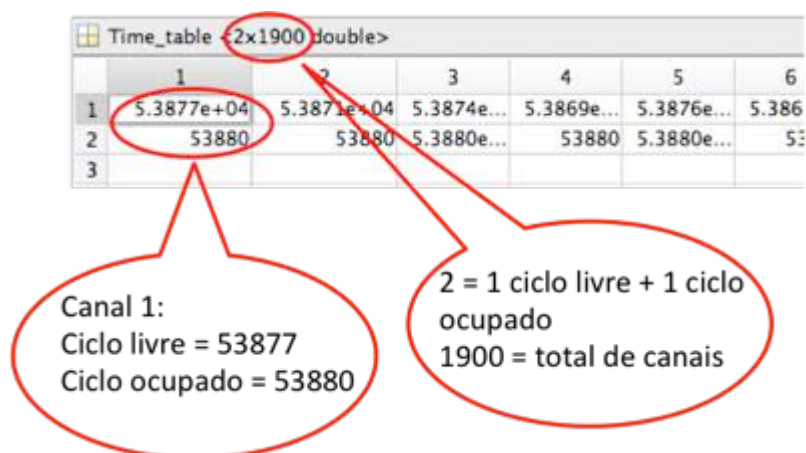
(b) Canal ocupado.



Fonte: o autor.

Para integração com os outros módulos, especialmente o MAU, o MDE fornece uma matriz de tempo contendo um ciclo de livre/ocupado para todos os canais do espectro. Esta matriz representa a ocupação instantânea dos mesmos. A Figura 5.11 mostra um exemplo de uma matriz de tempo.

Figura 5.11 - Exemplo de matriz de tempo.



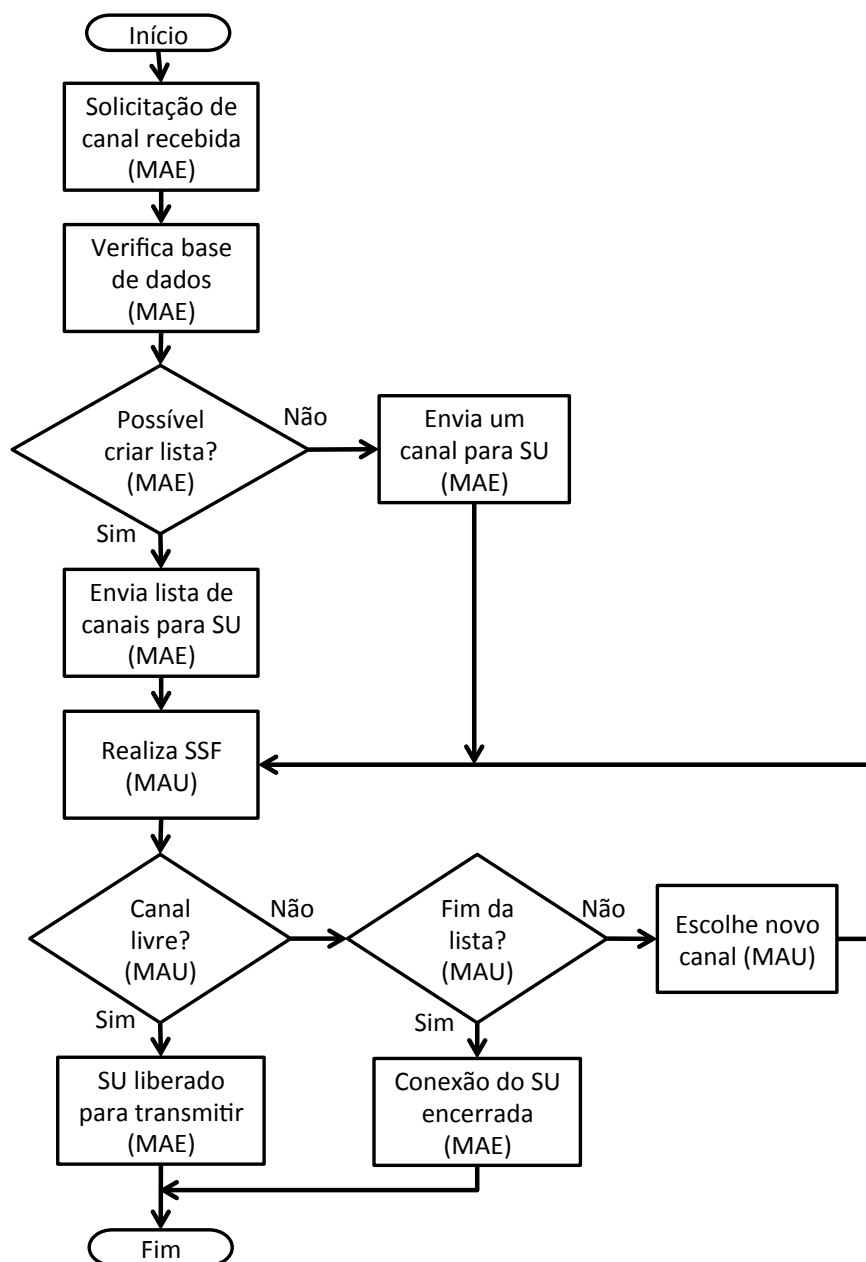
Fonte: o autor.

O código que implementa o MDE está disponível no Apêndice E.

5.6 Lista de Canais

Complementarmente ao especificado na IEEE 802.22, uma lista de canais por usuário é proposta neste trabalho. Assim, quando houver disponibilidade no espectro, uma lista de canais é reservada para cada usuário. Dessa forma, se o *sensing* no primeiro canal falhar, o SSF pode tentar os próximos canais da lista do usuário sem precisar interagir com o *Spectrum Manager* (SM). Ao final, a *Spectrum Sensing Function* (SSF) reporta ao SM o resultado da alocação para atualização do *Database Service* (DS). Esta lista pode ser mantida disponível para o usuário mesmo quando ele já estiver transmitindo em um canal. Assim, no caso de necessidade de mudança de canal devido à presença de um usuário primário (PU), o próprio SSF do SU pode realizar o *sensing* do próximo canal de sua lista. Caso este canal esteja livre, a troca é realizada. Caso contrário, a busca na lista de canais prossegue. O fluxograma da Figura 5.12 mostra este cenário. As indicações entre parênteses indicam o módulo responsável pela execução da ação.

Figura 5.12 - Implementação da lista de canais de usuário.



Fonte: o autor.

5.7 Gerenciamento dos Módulos

Após ter discorrido sobre o funcionamento dos outros módulos do sistema na Seção 5.1, fica facilitada a descrição de como opera o Módulo de Administração do Espectro (MAE). Além de executar as funções do *Spectrum Manager* (SM), este módulo também é responsável pelo gerenciamento do sistema.

Quando o sistema inicia, o MAE aciona o MGE para geração dos dados de ocupação de espectro. Conforme visto na Seção 5.1, ao final de seu ciclo de funcionamento, o MGE fornece esses dados em forma de arquivos para que o MCC faça a carga dos dados e classificação dos canais. Ao final do ciclo de trabalho do MCC é gerada uma matriz de lista de canais que é repassada ao MAE. Este módulo é responsável por selecionar na matriz de lista de canais, o vetor de canais que correspondente à hora atual da simulação.

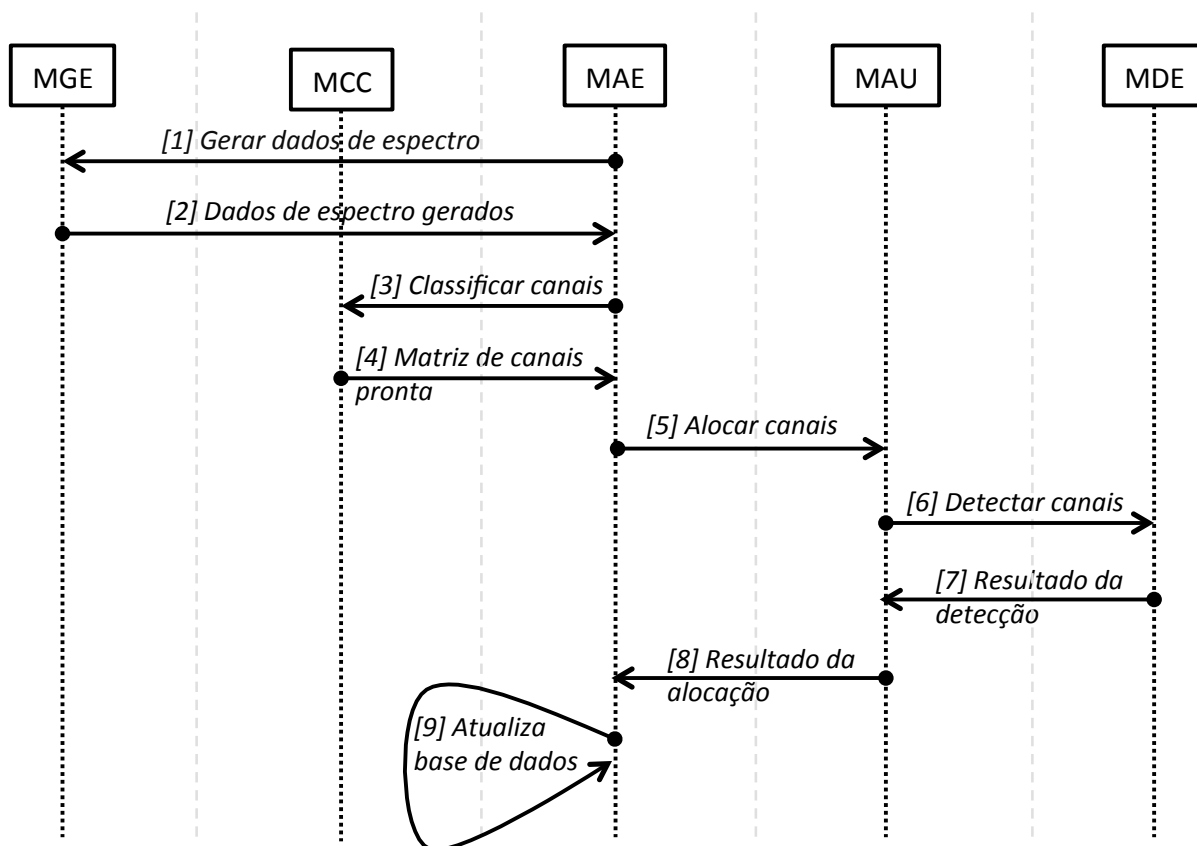
A próxima etapa é definir a quantidade de usuários secundários (SUs) a ser utilizada na simulação. Segundo a IEEE 802.22, o número máximo de usuários atendidos por uma BS pode chegar a até 512 usuários. Assim, para geração do número de usuários de forma aleatória, usa-se a seguinte função do MATLAB:

```
randi(512);
```

Dessa forma, o processo de alocação de canais é iniciado quando o MAE aciona o MAU repassando as informações de quantidade de usuários, bem como o vetor de canais disponíveis. No ciclo de trabalho do MAU existe uma comunicação constante entre este módulo e o MDE. Conforme visto na Seção 5.1.4, os resultados da detecção de espectro realizada pelo MDE são utilizados para avaliar o sucesso, ou não, na alocação dos canais. Portanto, estes resultados são repassados pelo MAU ao MAE para atualização da base de dados de canais.

O diagrama da Figura 5.13 mostra a sequência de troca de informações entre os módulos do sistema, para um ciclo de alocação.

Figura 5.13 - Troca de informações entre os módulos do sistema.



Fonte: o autor.

O código que implementa o MAE está disponível no Apêndice F.

5.8 Demandas de QoS

Neste trabalho foi assumido que a alocação de múltiplos canais para um mesmo usuário configura uma demanda por qualidade de serviço (QoS). No cenário de QoS, o usuário precisa de uma taxa maior do que os canais de 200 kHz podem proporcionar. Conforme mencionado no início deste capítulo, a alocação de bandas superiores a 200 kHz ocorre quando o sistema reserva sequências de canais livres no espectro.

O MAE é responsável por buscar as sequências de canais no espectro. A base para pesquisa das sequências é o mesmo espectro gerado pelo MGE e que posteriormente é classificado pelo MCC. Quando existe a presença de usuários de QoS, o MAE busca por sequências de canais para estes usuários e aciona o MAU

para alocação dos mesmos. Só depois da designação aos usuários de QoS que o sistema inicia a alocação para os demais SUs.

Sequências de canais da faixa TETRA que apresentem banda inferior à 200 kHz não são consideradas, por serem inferiores a largura do canal GSM/DCS. Assim, para uma sequência na faixa TETRA ser útil, precisa de pelo menos oito canais, já que seus canais têm largura de 25 kHz.

O módulo responsável pela alocação das sequências de canais também é o MAU. Ao acionar o MAU, o MAE deve passar a lista de usuários de QoS e a lista de sequências encontradas no espectro. Os usuários de QoS são gerados como um percentual do total de usuários, através da seguinte linha de comando do MATLAB:

```
randperm(Users, round(Qos_user_factor*Users));
```

Onde a variável *Users* representa o número total de usuários e *Qos_user_factor* é o percentual de usuários de QoS.

As sequências identificadas pelo MAE são passadas para o MAU na forma de uma matriz, onde cada linha representa uma sequência de canais. A Figura 5.14 mostra um exemplo desta matriz.

Figura 5.14 - Exemplo de matriz de sequência de canais.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 |
| 2 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 |
| 3 | 808 | 809 | 810 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 815 | 816 | 817 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 819 | 820 | 821 | 822 | 0 | 0 |
| 6 | 824 | 825 | 826 | 827 | 828 | 0 |
| 7 | 830 | 831 | 832 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 834 | 835 | 836 | 837 | 0 | 0 |
| 9 | 841 | 842 | 843 | 844 | 0 | 0 |
| 10 | 850 | 851 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: o autor.

O método de alocação utilizado pelo MAU, bem como as interações com o módulo MDE para realização da SSF, não mudam em relação ao que foi visto nas seções 5.1.3 e 5.1.4.

Quando o SU estiver transmitindo em uma sequência de canais, na base de dados este usuário estará ocupando todos os canais da sequência ao mesmo tempo.

A Figura 5.15 mostra um exemplo de base de dados de canais onde o usuário 219 está ocupando a sequência que vai do canal 201 ao 210.

Figura 5.15 - Usuário ocupando sequência de canais.

| Channel_db <950x5 double> | | | | | |
|---------------------------|-----|---|---|---|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 82 | 197 | 1 | 1 | 0 | 102 |
| 83 | 199 | 1 | 1 | 0 | 103 |
| 84 | 201 | 1 | 1 | 0 | 219 |
| 85 | 202 | 1 | 1 | 0 | 219 |
| 86 | 203 | 1 | 1 | 0 | 219 |
| 87 | 204 | 1 | 1 | 0 | 219 |
| 88 | 205 | 1 | 1 | 0 | 219 |
| 89 | 206 | 1 | 1 | 0 | 219 |
| 90 | 207 | 1 | 1 | 0 | 219 |
| 91 | 208 | 1 | 1 | 0 | 219 |
| 92 | 209 | 1 | 1 | 0 | 219 |
| 93 | 210 | 1 | 1 | 0 | 219 |
| 94 | 212 | 1 | 1 | 0 | 104 |
| 95 | 213 | 1 | 1 | 0 | 106 |

Fonte: o autor.

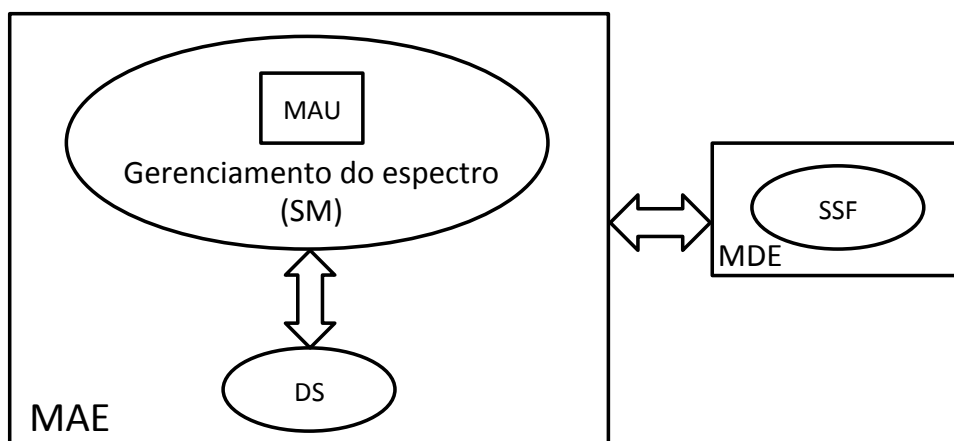
O código que implementa a alocação de canais para usuários de QoS faz parte dos módulos MAE e MAU e está disponível nos Apêndices F e D, respectivamente.

5.9 Modo Adaptativo

No modo adaptativo o sistema funciona como se não houvesse a presença do Módulo Gerador de Espectro (MGE) e Módulo de Classificação de Canais (MCC). Dessa forma, o *Spectrum Manager* (SM), representado pelo Módulo de Administração do Espectro (MAE), deve descobrir de forma autônoma os canais com maior disponibilidade no espectro, utilizando apenas sua função adaptativa.

A Figura 5.16 mostra uma versão da Figura 5.2, sem a presença do MGE e MCC. O relacionamento entre os demais módulos do sistema não se altera em relação ao que foi visto até aqui no Capítulo 5.

Figura 5.16 - Relacionamento entre os módulos do sistema no modo adaptativo.



Fonte: o autor.

Quando o MAE trabalha em modo adaptativo não existe uma base de dados de canais com dados de predição. Assim, todos os canais são assumidos como livres e a alocação dos mesmos é feita de forma aleatória. Desse modo, com os acertos e falhas no processo de alocação, a probabilidade de sucesso dos canais vai sendo atualizada, até que os canais com maior sucesso naturalmente se coloquem no início da lista, sendo os mais acessados. De forma contrária, os canais com menor probabilidade de sucesso vão se posicionando no final da lista e tendem a ter pouca utilização.

A Figura 5.17 mostra um exemplo de parte de uma matriz de estatísticas de canal. O número de linhas indica o número de canais do espectro. As colunas representam as seguintes informações: [1] número do canal, [2] número de sucessos, [3] número de falhas, [4] probabilidade de sucesso. A probabilidade de sucesso do canal P_c , é obtida através da Equação 5.1.

$$P_c = \frac{\text{número de sucessos}}{\text{número de sucessos} + \text{número de falhas}} \quad (5.1)$$

Figura 5.17 - Matriz de estatísticas de canal.

| Channel_stats <1900x4 double> | | | | |
|-------------------------------|----|----|---|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 47 | 1 | 0.9792 |
| 2 | 2 | 47 | 1 | 0.9792 |
| 3 | 3 | 37 | 1 | 0.9737 |
| 4 | 4 | 50 | 1 | 0.9804 |
| 5 | 5 | 47 | 1 | 0.9792 |
| 6 | 6 | 64 | 1 | 0.9846 |
| 7 | 7 | 63 | 1 | 0.9844 |
| 8 | 8 | 69 | 1 | 0.9857 |
| 9 | 9 | 63 | 1 | 0.9844 |
| 10 | 10 | 48 | 1 | 0.9796 |
| 11 | 11 | 83 | 1 | 0.9881 |
| 12 | 12 | 97 | 0 | 1 |
| 13 | 13 | 25 | 0 | 0.9450 |

[1] = canal
 [2] = sucesso
 [3] = falha
 [4] = probabilidade
 de sucesso

Fonte: o autor.

Na Seção 3.2 foi visto que a IEEE 802.22 prevê um cenário onde o *Database Service* (DS) não está disponível. Ainda, o padrão prevê que na ausência de informações prévias dos canais, a *Base Station* (BS) seja capaz de identificar as oportunidades no espectro durante sua inicialização e operação. No modo adaptativo, o MAE constrói a base de dados de canais com base nos resultados das alocações de SUs. Inicialmente, os canais são escolhidos de forma aleatória em todo o espectro disponível e, ao longo do processo de alocação, são classificados segundo sua probabilidade de sucesso. Conforme os ciclos de alocação avançam, os canais com maior probabilidade de sucesso são priorizados para alocação de SUs. Assim, o modo adaptativo se ajusta a esse requisito, na medida que possibilita que a BS opere de forma independente na busca por oportunidades para alocação de usuários.

No exemplo da Figura 5.18 é possível verificar a evolução da lista de canais ao longo dos ciclos de alocação (iterações) no modo adaptativo. A matriz mostrada nesta figura considera uma lista de 570 canais (colunas) e 100 iterações (linhas). Na Figura 5.18a pode-se observar alterações na lista de canais a partir da terceira iteração, quando os acertos começam a surgir e a lista se estabiliza rapidamente. Na Figura 5.18b pode-se notar alterações a partir da segunda posição na iteração 62. Na Figura 5.18c, especificamente na iteração 98, a lista é alterada novamente nas primeiras posições. A lista de canais é atualizada sempre ao final de cada iteração,

quando os canais são liberados para início de nova iteração, para um novo grupo de usuários.

Figura 5.18 - Evolução da lista de canais no modo adaptativo.

(a) Situação da lista de canais nas dez primeiras iterações.

| Channel_list_history <100x570 double> | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----|-----|------|-----|----|-----|------|------|------|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 321 | 317 | 1300 | 135 | 31 | 238 | 1685 | 1749 | 1406 | 77 | 85 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 10 | 11 | 13 | 17 | 21 | 24 | 26 | 3 |
| 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 9 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 10 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 11 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |

(b) Situação da lista de canais na iteração 50.

| Channel_list_history <100x570 double> | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 57 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 58 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 59 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 60 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 61 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
| 62 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 |
| 63 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 |
| 64 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 |
| 65 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 |
| 66 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 |
| 67 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 |

(c) Situação da lista de canais na última iteração.

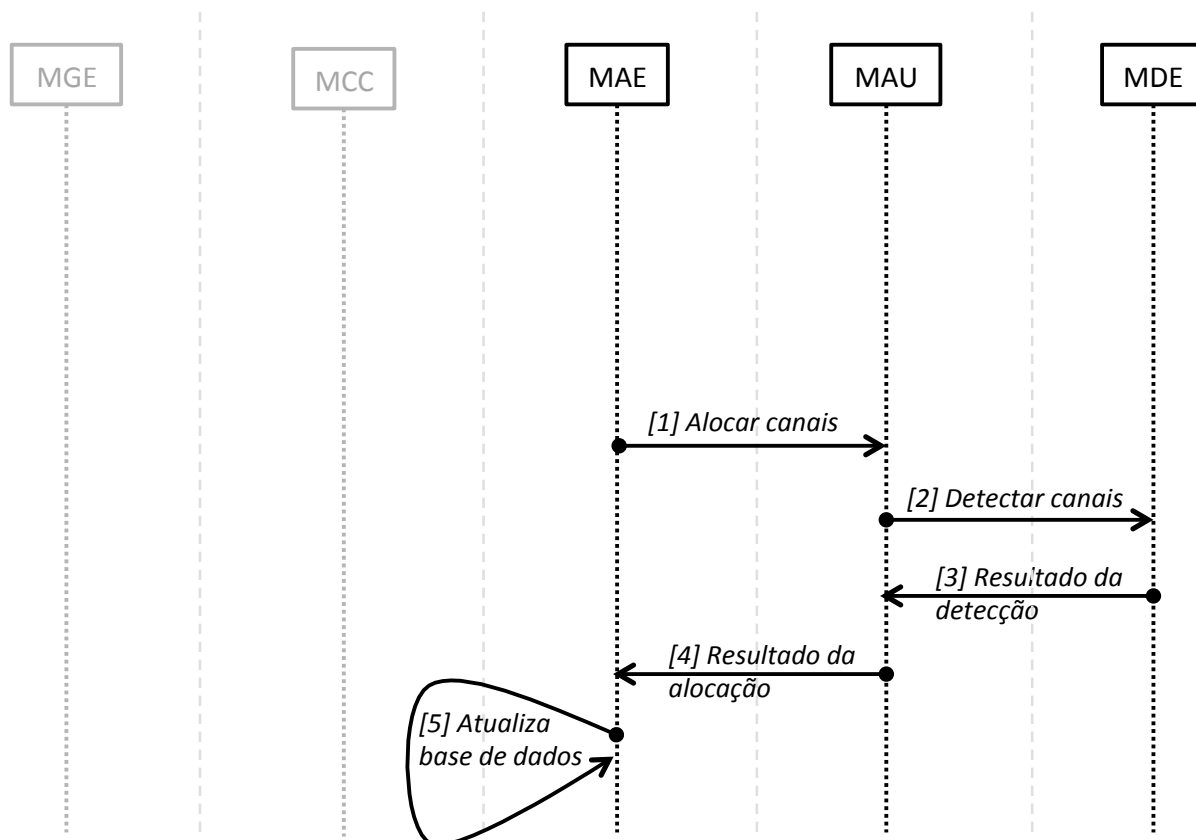
| Channel_list_history <100x570 double> | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 91 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 92 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 93 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 94 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 95 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 96 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 97 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 98 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 99 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 100 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 101 | | | | | | | | | | | |

Fonte: o autor.

Conforme mencionado no início desta seção, no modo preditivo o MGE e MCC não participam do processo de gerenciamento de espectro. A Figura 5.19

mostra o relacionamento entre os módulos do sistema com a ausência destes dois módulos.

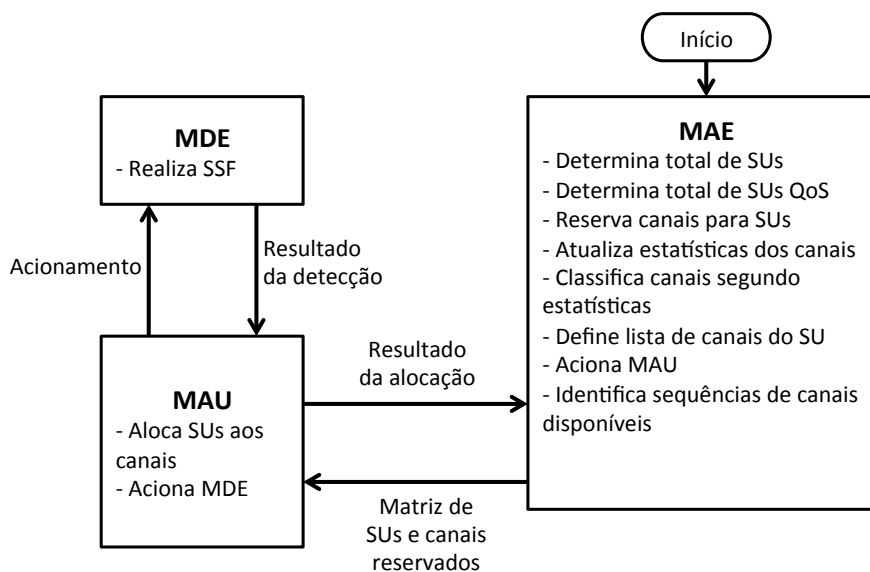
Figura 5.19 - Relacionamento entre os módulos do sistema no modo adaptativo.



Fonte: o autor.

A Figura 5.20 mostra as entradas e saídas do sistema no modo adaptativo, o tipo de dado que trafega entre os módulos e as funções executadas por cada um.

Figura 5.20 - Funções, entradas e saídas dos módulos no modo adaptativo.



Fonte: o autor.

O código que implementa o modo adaptativo faz parte do MAE e está disponível no Apêndice F.

6 Planejamento dos Experimentos

Os resultados apresentados neste capítulo consideram uma série de cenários, focados em demonstrar a eficiência em utilizar uma base de dados de canais, no âmbito da operação de uma rede de rádios cognitivos (CRN). Além disso, é mostrado que a atualização das falhas e acertos na alocação dos canais é de fundamental importância para manutenção desta base.

Os parâmetros de configuração do sistema e suas funções são descritos a seguir. Para cada simulação os mesmos são informados, de forma que permite contextualizar os resultados obtidos.

Usuários: especifica o número de usuários a serem alocados por iteração. Conforme visto no Capítulo 3, a IEEE 802.22 prevê que uma *base station* (BS) seja capaz de atender até 512 usuários em sua região de cobertura.

Modo usuários: terá o valor *fixo* quando não houver variação no número de usuários. Com o valor *randômico* indica que, a cada iteração, o número de usuários será um valor aleatório entre 1 e o valor definido em *Usuários*.

Iterações: número de iterações executadas pelo programa. Também é definido como ciclo de alocação. A cada iteração, a quantidade de SUs especificada em *Usuários* será alocada de acordo com a disponibilidade do espectro. O critério de parada é a alocação do último SU da lista de usuários.

Método: indica o modo de utilização do sistema. *DB* especifica o uso da base de dados de canais. Outras opções possíveis são *sequencial* ou *randômico*, que são modos de busca de canal que não utilizam a base de dados. Os mesmos serão detalhados ao longo deste capítulo.

Atualiza DB: quando possui valor *sim*, as falhas e acertos na alocação serão utilizados para atualizar a base de dados.

Espectro útil: indica o número de canais disponíveis para alocação de SUs. O valor típico varia de 570 a 760 canais, ou seja, de 30% a 40% de todo o espectro. A soma das bandas TETRA UL, GSM 900 UL e DCS 1800 UL, que são as menos utilizadas, resulta em um total de 950 canais.

Usuários QoS: número de usuários com demanda de QoS. São os SUs que alocam sequências de canais disponíveis no espectro, conforme visto na Seção 5.3.

Autoaprendizado: se ativado, não utiliza dados de predição da base de dados para criação da lista de canais. Ou seja, apenas os resultados da detecção são utilizados para este fim. Esse modo de operação é definido como modo adaptativo.

Para facilitar a demonstração e análise dos resultados, foram criados indicadores. Ao final de cada simulação os mesmos são apresentados. Cada indicador representa as seguintes informações:

Sucesso canal: indica probabilidade de sucesso de alocação dos canais da base de dados. É calculado pela Equação 6.1.

$$Sucesso\ canal = 100 * \frac{Total\ sucessos\ detecção\ canal}{Total\ sucessos\ detecção\ canal + Total\ falhas\ detecção\ canal} \quad (6.1)$$

Onde Total sucessos detecção canal é soma de sucessos de detecção e Total falhas detecção canal é a soma das falhas de detecção de todos os canais da base de dados.

Total usuários: é a soma dos usuários de todas as iterações.

Usuários não alocados: é a soma dos usuários não alocados de todas as iterações. Representa os usuários que não conseguiram acessar a rede.

Sucesso usuário: indica a probabilidade de sucesso na alocação dos usuários de todas as iterações. É calculada pela Equação 6.2.

$$Sucesso\ usuário = 100 * \frac{Total\ usuários - Usuários\ não\ alocados}{Total\ usuários} \quad (6.2)$$

Sucesso detecção: indica a probabilidade de sucesso de detecção do canal na primeira tentativa, para cada iteração. É definido pela Equação 6.3.

$$Sucesso\ detecção = 100 * \frac{Sucessos\ detecção\ canal}{Sucessos\ detecção\ canal + Falhas\ detecção\ canal} \quad (6.3)$$

Onde Sucessos detecção canal indica o número de sucessos de detecção e Falhas detecção canal representa o número de falhas de detecção, ambos para a iteração corrente.

Falha detecção: indica a probabilidade de falha na detecção do canal, para cada iteração. É definido pela Equação 6.4.

$$Falha\ detecção = 100 * \frac{Falhas\ detecção\ canal}{Sucessos\ detecção\ canal + Falhas\ detecção\ canal} \quad (6.4)$$

Nas próximas seções serão apresentadas as simulações em cenários variados. Ao final de um conjunto de cenários será apresentada uma tabela para comparação dos resultados obtidos.

Os cenários de simulação estão subdivididos em três grupos, de acordo com as demandas de canais. São eles:

Pequena escala: número de canais muito maior que o número de usuários. Valores típicos: 100 usuários, 760 canais.

Média escala: número de usuários variável a cada iteração. Valores típicos: número de usuários variável (número randômico entre 1 e 512), 570 canais.

Larga escala: número de canais próximo do número de usuários. Valores típicos: 512 usuários, 570 canais.

Para facilitar a compreensão dos resultados, a análise dos mesmos será baseada em simulações de média escala. Por apresentar certa imprevisibilidade com relação à quantidade de SUs, este modo representa um cenário mais condizente com o comportamento real dos usuários. Entretanto, os resultados das simulações com pequena e larga escala estão disponíveis, respectivamente, nos apêndices G e H, para cada um dos cenários abordados a seguir.

6.1 Validação dos Resultados

Para validação do sistema proposto, foram utilizados cinco cenários diferentes de alocação de canais:

- Cenário 1: trata-se do sistema proposto, que utiliza uma base de dados preditiva e adaptativa para alocação dos canais;
- Cenário 2: utiliza uma base de canais somente com caráter preditivo, não considerando a adaptabilidade;

- Cenário 3: não utiliza uma base de dados de canais. Os mesmos são buscados de forma sequencial no espectro disponível para alocação;
- Cenário 4: não utiliza uma base de dados de canais. Os mesmos são buscados de forma aleatória no espectro disponível para alocação
- Cenário 5: utiliza uma base de canais somente com caráter adaptativo, não considerando os dados de predição.

Nas próximas seções os resultados das simulações destes cenários são avaliados e na Seção 6.1.6 os resultados destes cinco cenários são comparados.

6.1.1 Cenário 1: Base de Dados Preditiva Adaptativa

A Tabela 6.1 apresenta os parâmetros de configuração e resultados para uma simulação de média escala, utilizando o sistema proposto. A Figura 6.1 apresenta os gráficos para esta simulação.

Tabela 6.1 - Cenário 1 em situação de média escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | randômico | 100 | DB | sim | 570 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 96,26 | 25459 | 0 | 100 | 97,31 | 2,69 |

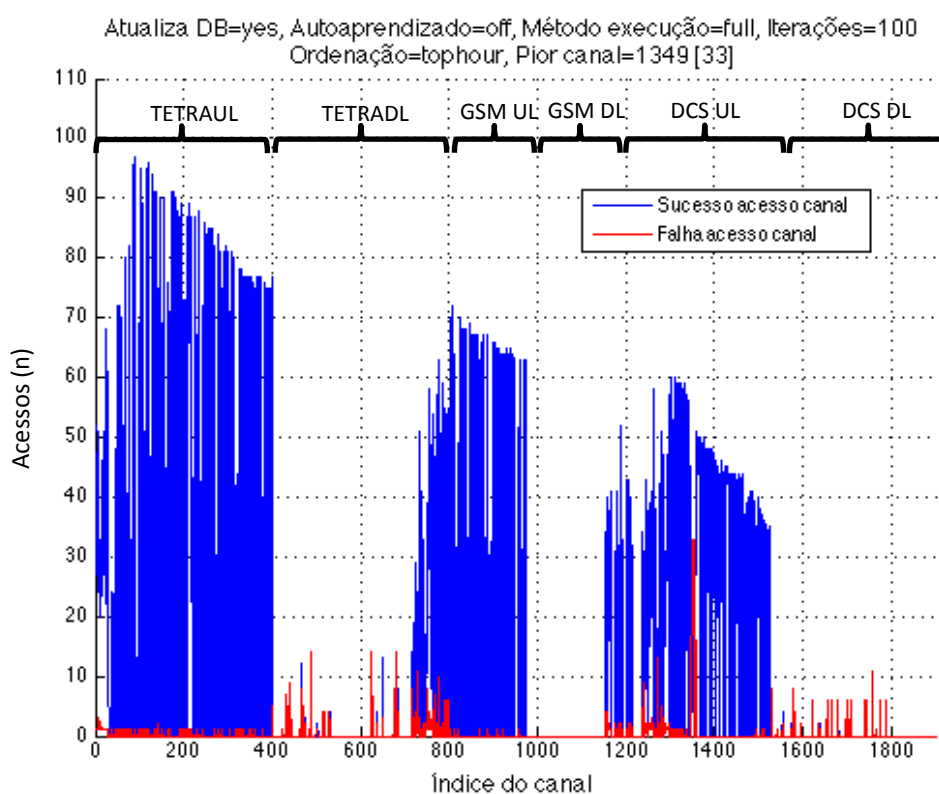
Fonte: o autor.

Nesta seção, antes de cada gráfico, será apresentado um breve comentário a respeito das curvas plotadas, a fim de facilitar o entendimento e familiarizar o leitor com as informações disponibilizadas. Esses gráficos serão utilizados em todas as simulações, sendo que sua interpretação deve ser feita da mesma forma para as próximas seções. Na Seção 6.1.6 os resultados de todas as simulações serão avaliados.

Nota-se pela Figura 6.1a que a maior parte dos acessos ficaram concentrados nas faixas menos congestionadas (TETRA UL, GSM 900 UL e DCS 1800 UL). Algumas falhas em vermelho podem ser percebidas, entretanto, para os valores maiores, houve também uma redução do acesso (azul). Isto demonstra que os canais, ao apresentarem falha de acesso, passam a ser menos alocados pelo sistema, pois sua probabilidade de sucesso decaiu. Este comportamento é desejado e confirma a eficiência do caráter adaptativo da base de dados.

Figura 6.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de média escala.

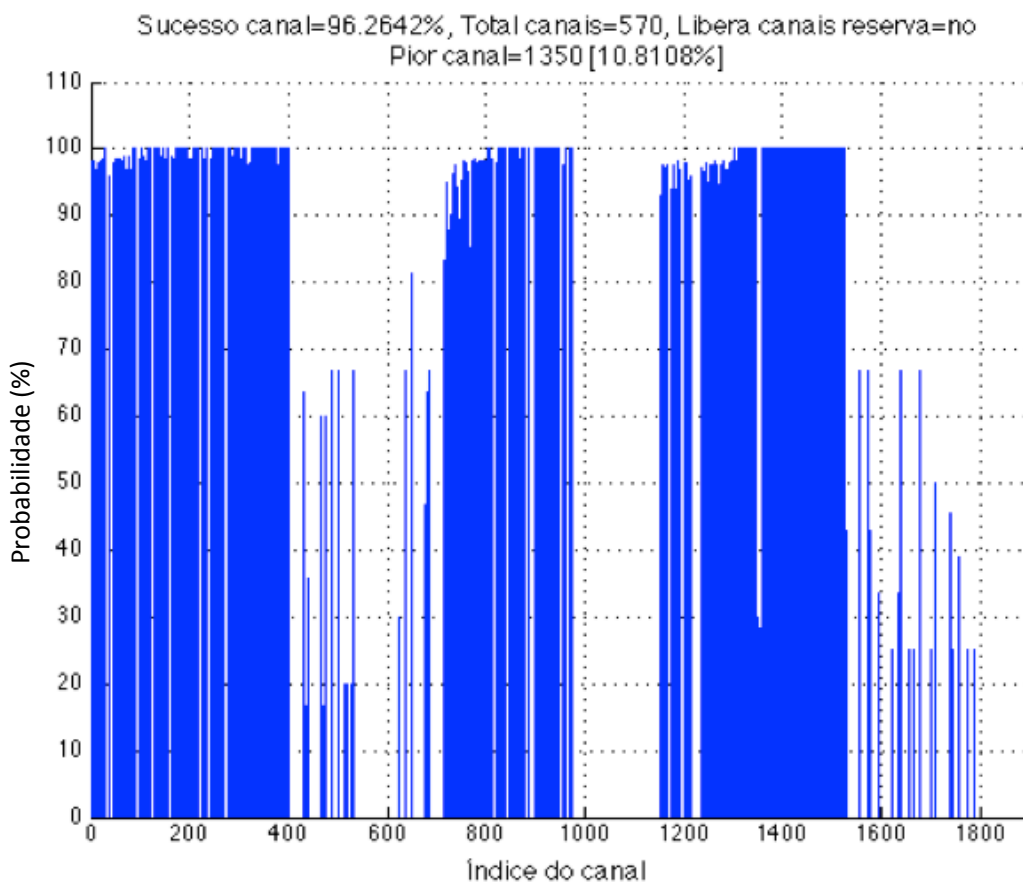
(a) Contadores de acesso aos canais.



A Figura 6.1b confirma que os canais com menor probabilidade de sucesso estão nas faixas mais congestionadas do espectro.

Figura 6.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de média escala.

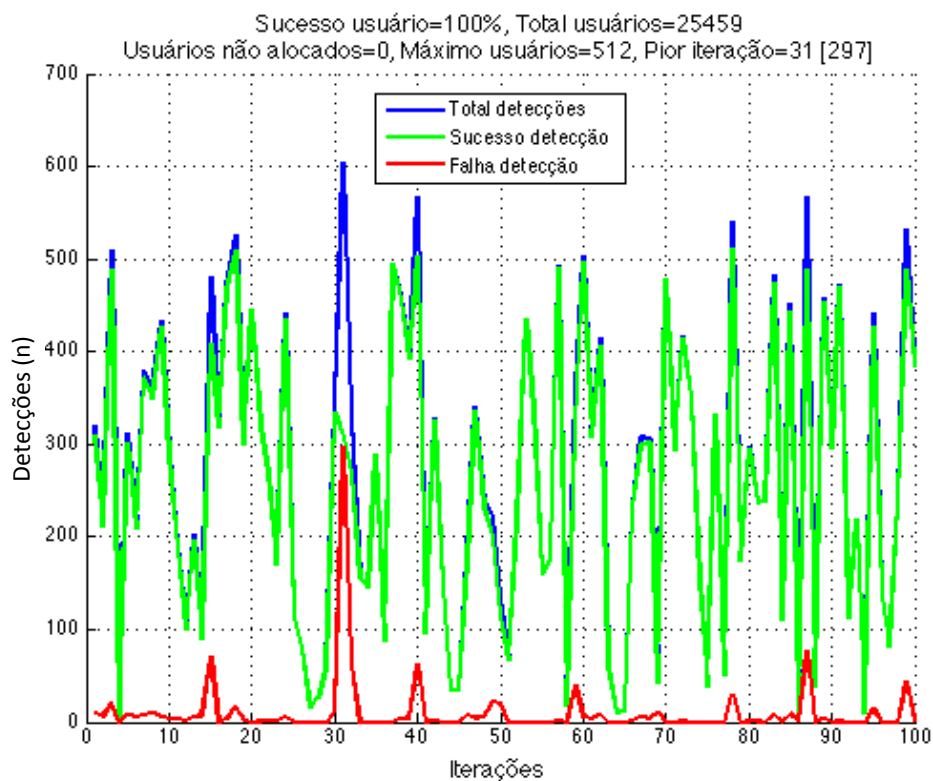
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Na Figura 6.1c o total de detecções (azul) e sucesso de detecções (verde) variam conforme a quantidade de usuários da iteração. Na ocorrência eventual de falhas (vermelho), o aumento de detecções (azul) aumenta. Isto ocorre porque quando o canal está ocupado, o SM deve buscar um novo canal para o SU, realizando novas detecções.

Figura 6.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de média escala.

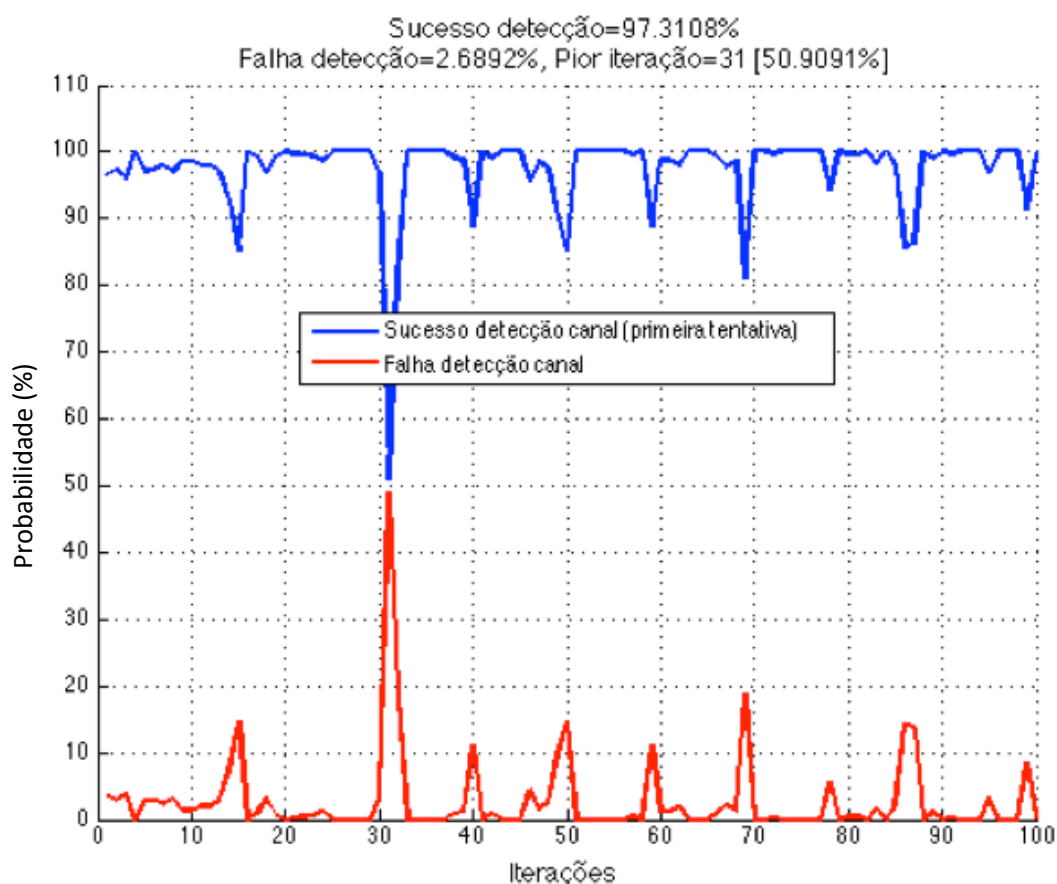
(c) Contadores de acesso do usuário.



Na Figura 6.1d pode-se observar alguns picos negativos nos sucessos de detecção (azul), porém a média de sucesso de detecção, ao final das 100 iterações, ficou em 97,31%. Isto ocorre porque, eventualmente, ao encontrar uma sequência grande de canais ocupados, são necessárias mais detecções para alocar os usuários. Ainda assim, conforme pode ser visto na Figura 6.1c, todos os usuários foram alocados.

Figura 6.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de média escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

6.1.2 Cenário 2: Base de Dados Preditiva

A Tabela 6.2 mostra os parâmetros utilizados e os resultados obtidos para uma simulação de média escala, considerando apenas o caráter preditivo. A Figura 6.2 apresenta os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela 6.2 - Cenário 2 em situação de média escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | randômico | 100 | DB | não | 570 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

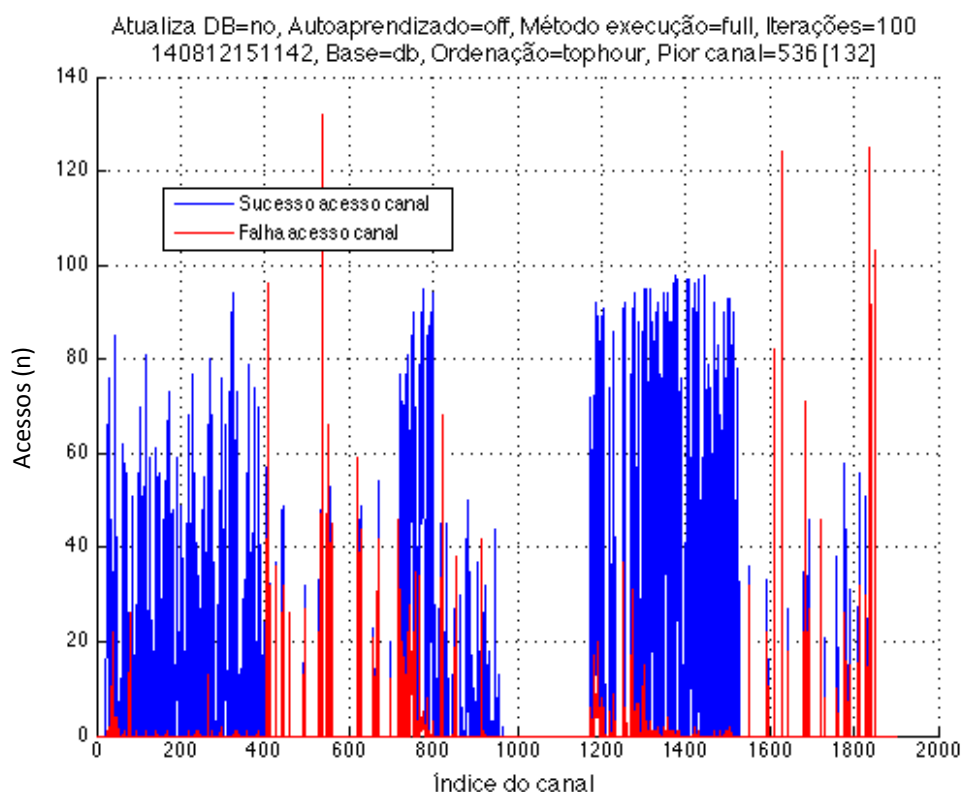
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 86,91 | 24773 | 0 | 100 | 88,35 | 11,65 |

Fonte: o autor.

Na Figura 6.2a pode-se observar que sem a atualização da base de dados a ocorrência de falhas de acesso (vermelho) aumenta em comparação à Figura 6.1a. Ainda assim, devido ao uso de dados de predição de espectro, a maior parte dos acessos (azul) fica nas faixas menos congestionadas do espectro.

Figura 6.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de média escala.

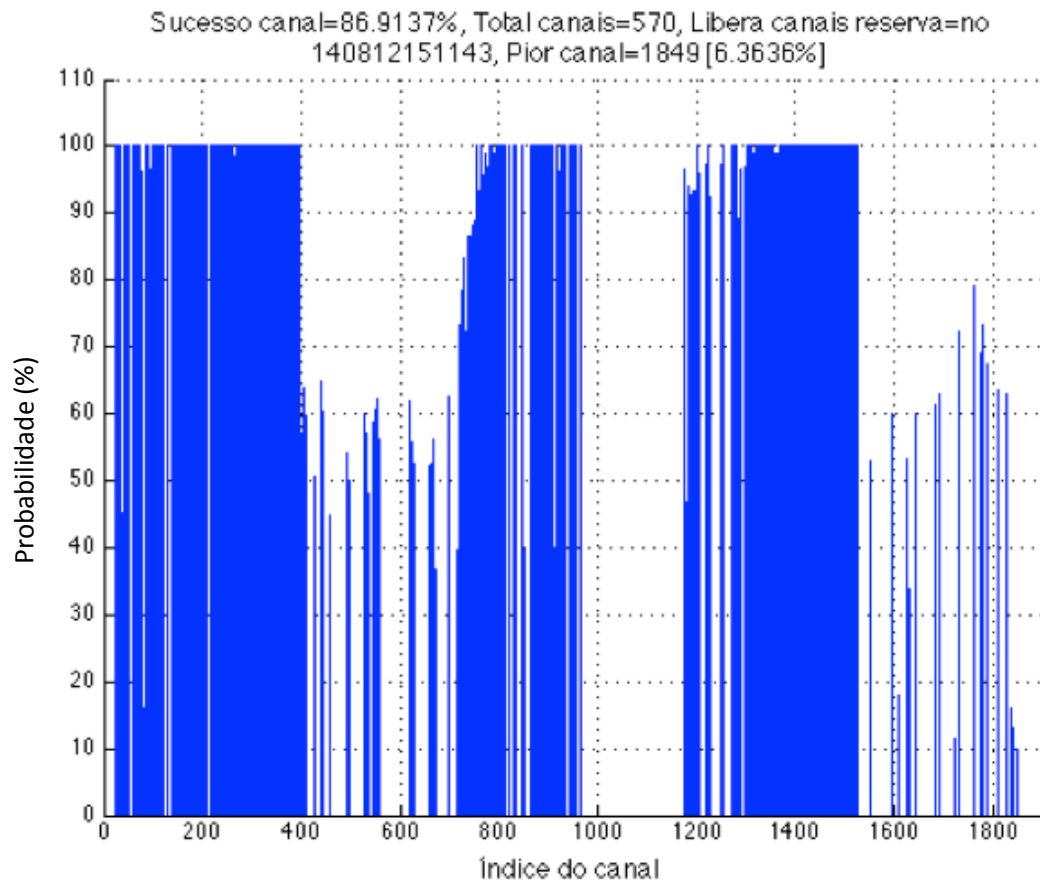
(a) Contadores de acesso aos canais.



A Figura 6.2b mostra que a probabilidade de sucesso dos canais cai onde há maior ocorrência de falhas.

Figura 6.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de média escala.

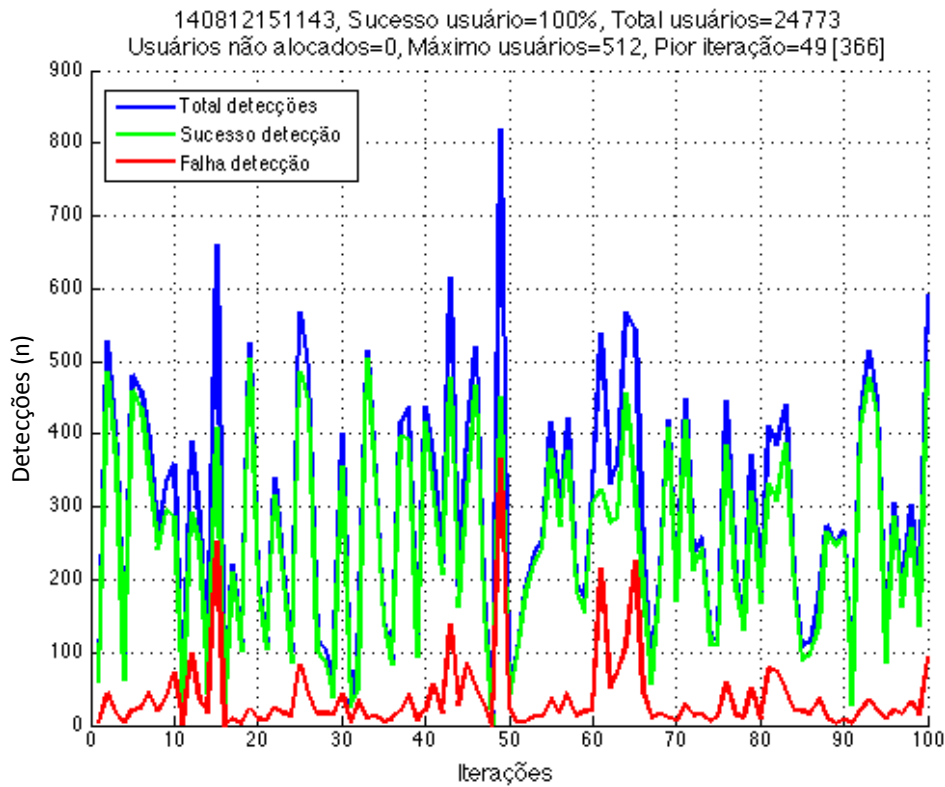
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Na Figura 6.2c pode-se observar um aumento no número de detecções em função da maior ocorrência de falhas.

Figura 6.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de média escala.

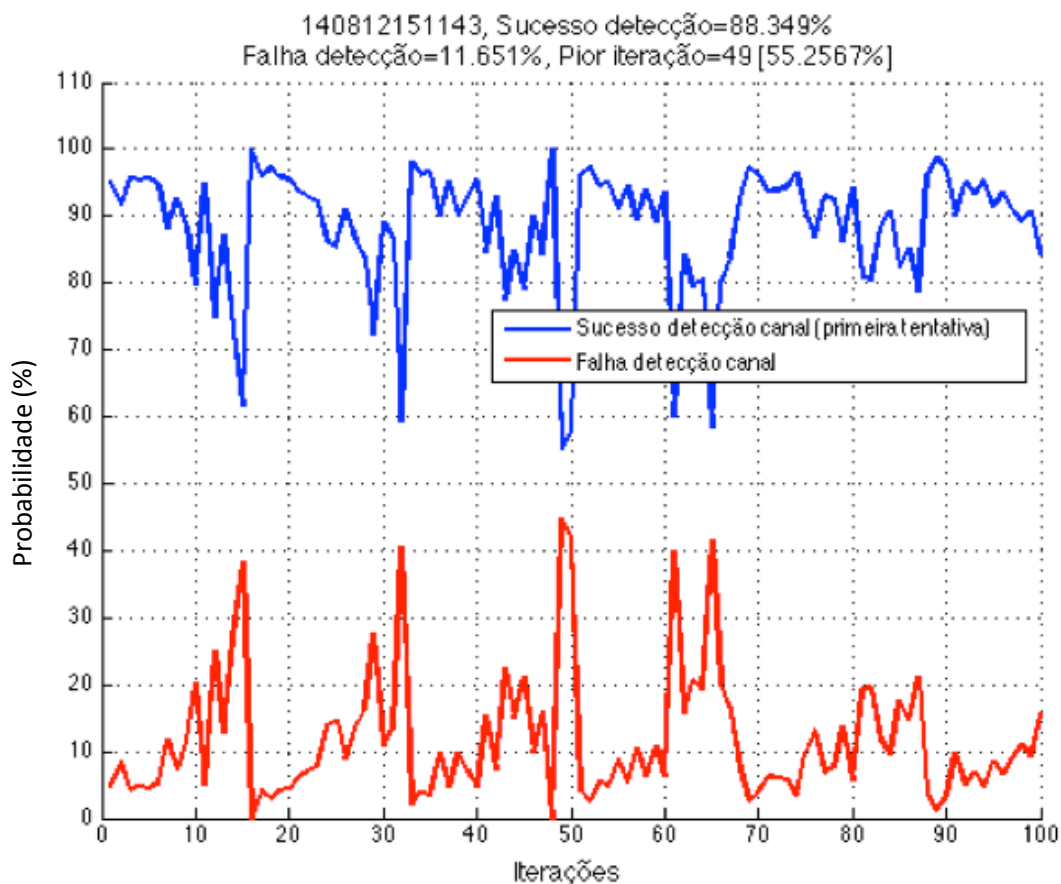
(c) Contadores de acesso do usuário.



Na Figura 6.2d nota-se que o sucesso de detecção caiu em relação ao Cenário 1 (Figura 6.1d).

Figura 6.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de média escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

6.1.3 Cenário 3: Busca Sequencial

Neste cenário não há presença de uma base de dados. Para cada iteração, a busca do canal para detecção ocorre de forma sequencial, a partir de um número inicial gerado de forma aleatória. Apesar de ser um método pouco utilizado na prática, serve para validação do método proposto, da mesma forma que é utilizado em outros trabalhos (VARTIAINEN; HÖYHTYÄ; LEHTOMÄKI; BRÄYSY, 2010).

A Tabela 6.3 mostra os parâmetros de configuração utilizados e os resultados obtidos para o Cenário 3, com média escala. A Figura 6.3 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela 6.3 - Cenário 3 em situação de média escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|------------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | randômico | 100 | sequencial | n/a | 570 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

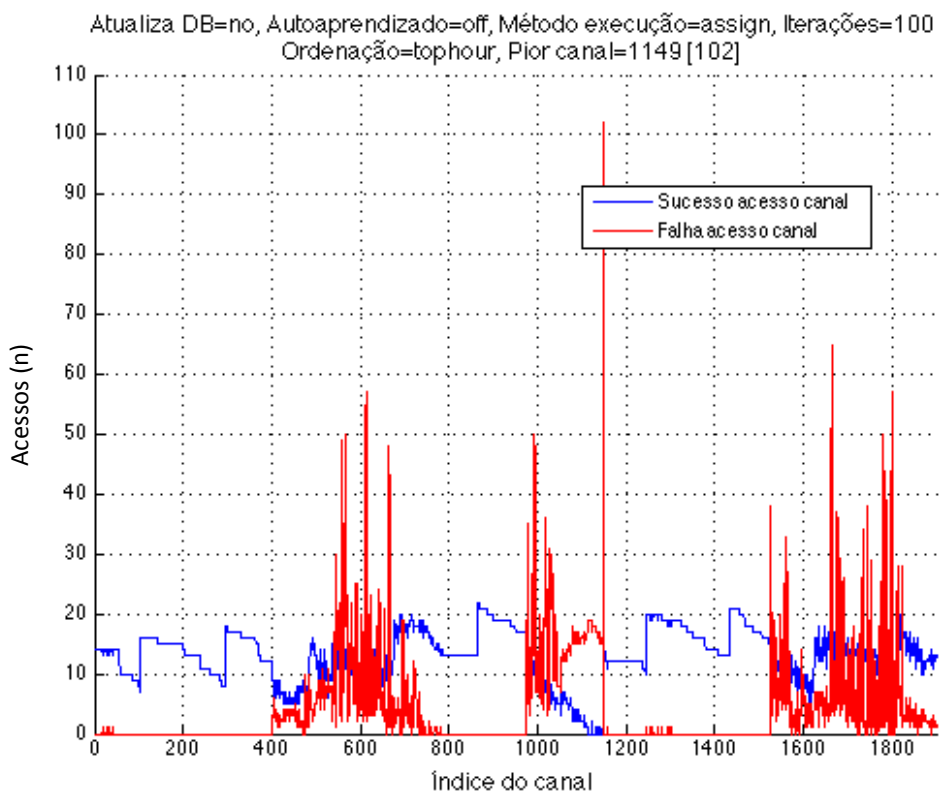
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 75,32 | 24908 | 226 | 99,09 | 80,93 | 19,07 |

Fonte: o autor.

Observa-se na Figura 6.3a uma quantidade de falhas de acesso (vermelho) superior ao número de sucessos (azul), nas faixas congestionadas do espectro. Como não há atualização da base de dados, tampouco o uso de dados de previsão neste cenário, a quantidade de acessos nessas faixas persiste, mesmo na ocorrência de falhas. Observa-se também que, quando o acesso ocorre nas faixas menos utilizadas, a quantidade de sucessos é maior do que a de falhas.

Figura 6.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de média escala.

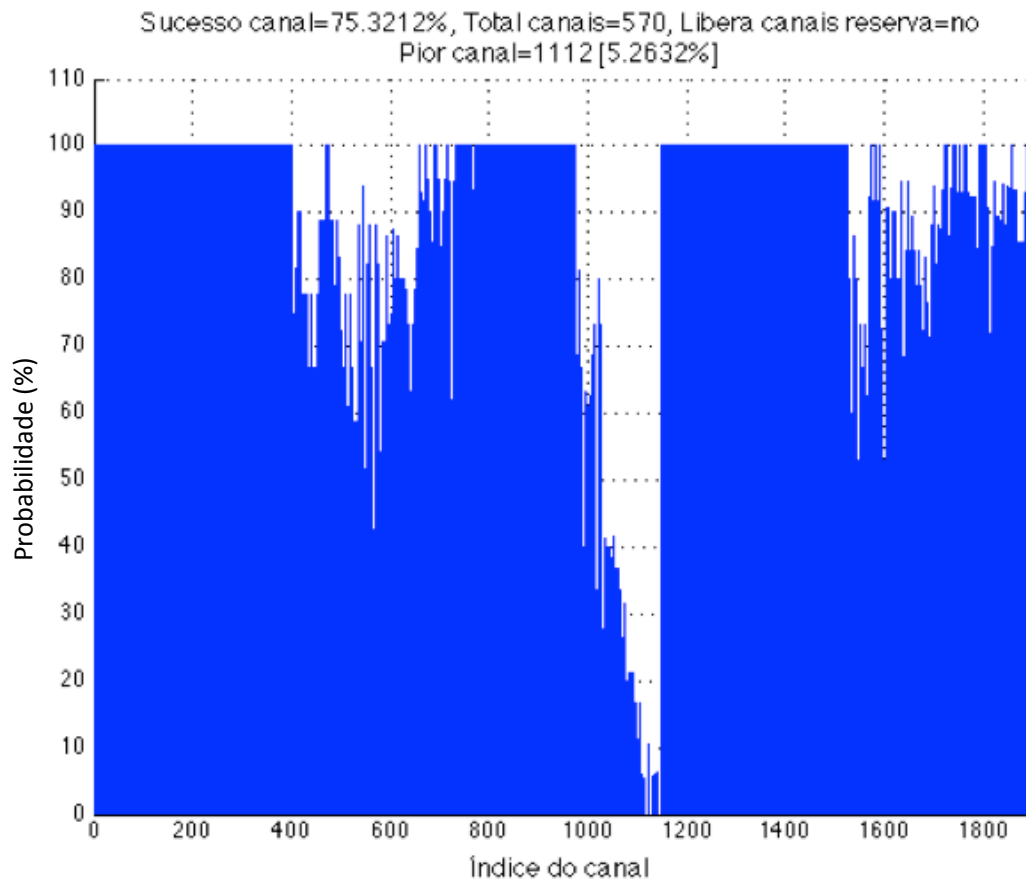
(a) Contadores de acesso aos canais.



Na Figura 6.3b confirma-se a baixa probabilidade de sucesso nas bandas congestionadas e o melhor desempenho nas faixas menos utilizadas.

Figura 6.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de média escala.

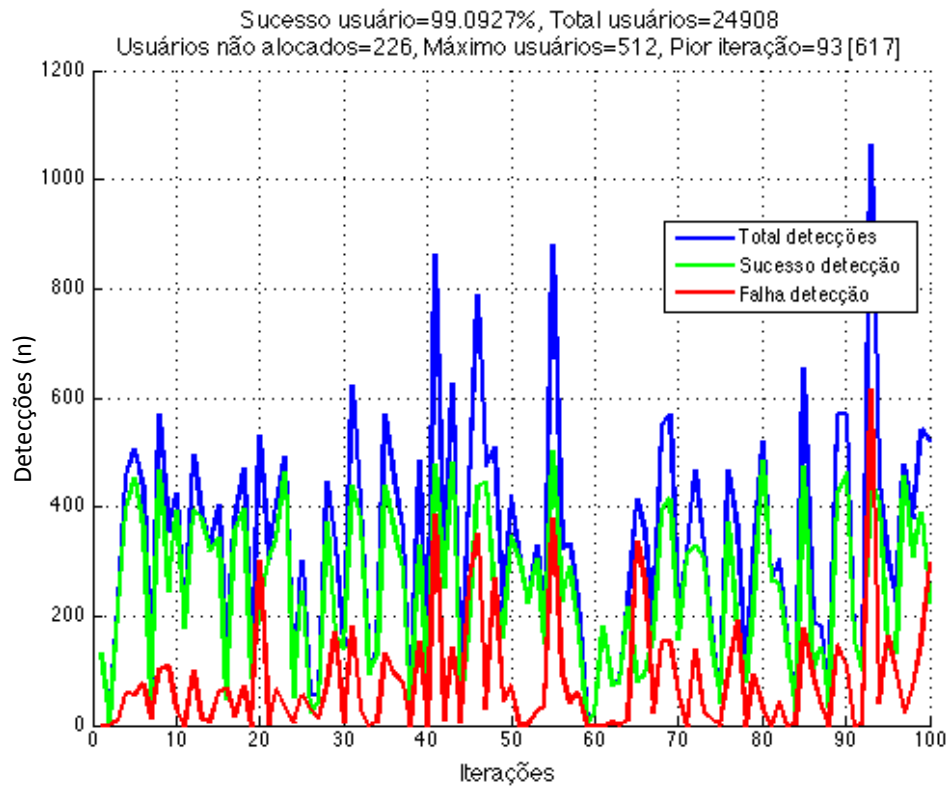
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Na Figura 6.3c nota-se o aumento nas falhas de detecção (vermelho) em relação às simulações anteriores.

Figura 6.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de média escala.

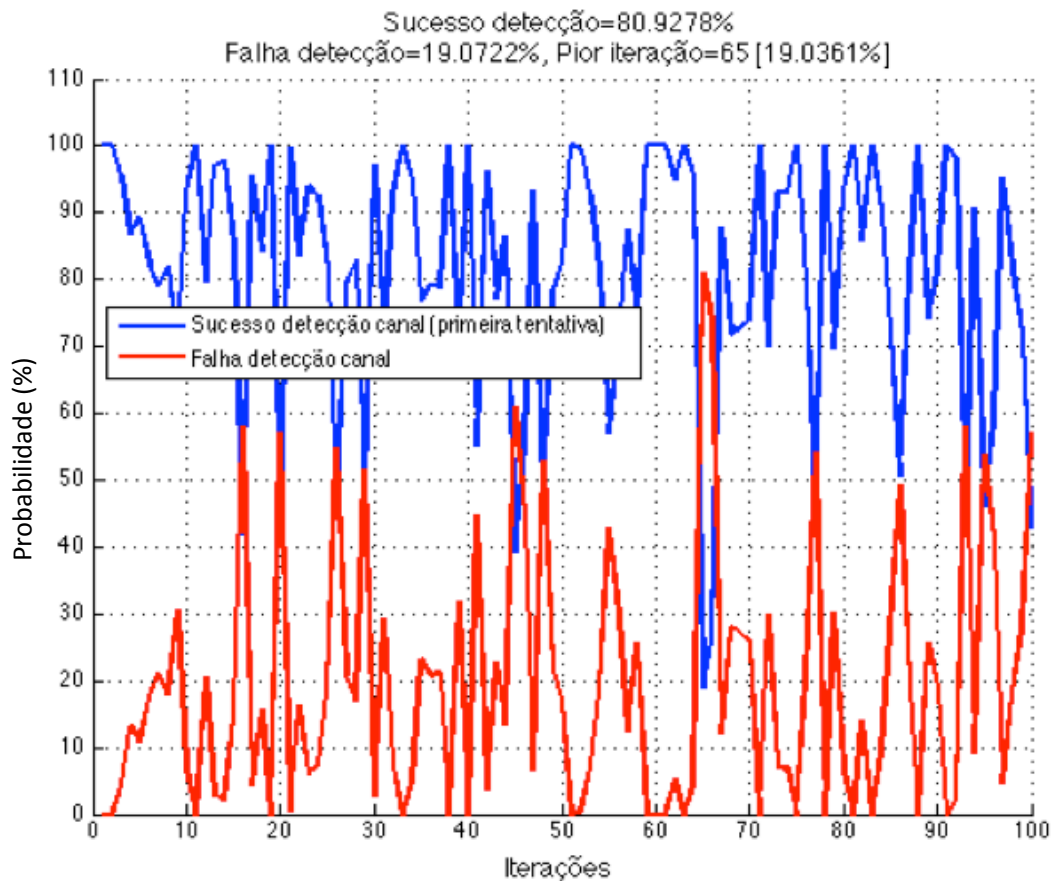
(c) Contadores de acesso do usuário.



Na Figura 6.3d verifica-se a queda na probabilidade de sucesso de detecção em relação às simulações anteriores.

Figura 6.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de média escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

6.1.4 Cenário 4: Busca Randômica

Neste cenário também não há presença de uma base de dados. Para cada iteração, a busca do canal para detecção ocorre de forma aleatória. Semelhante ao caso do Cenário 3, esta simulação serve para validação do método proposto, do mesmo modo que é utilizado para validação de outros trabalhos (VARTIAINEN; HÖYHTYÄ; LEHTOMÄKI; BRÄYSY, 2010).

A Tabela 6.4 mostra os parâmetros de configuração utilizados e os resultados obtidos para o Cenário 4, em simulação de média escala. A Figura 6.4 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela 6.4 - Cenário 4 em situação de média escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|-----------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | randômico | 100 | randômico | n/a | 570 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

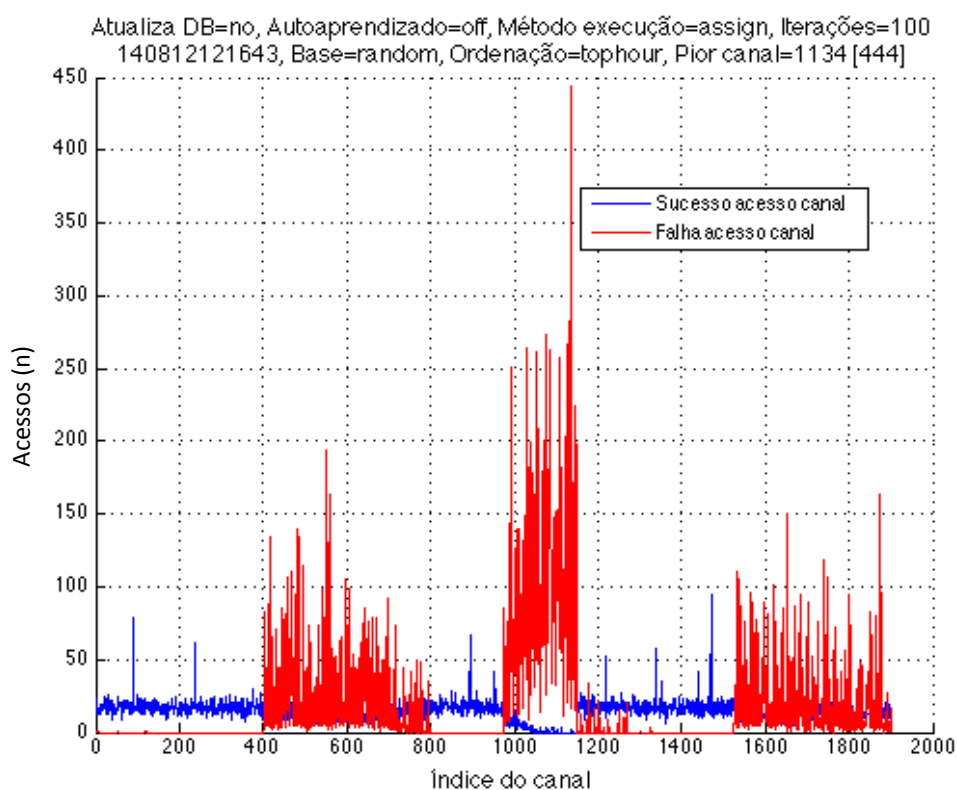
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 43,89 | 27264 | 19 | 99,93 | 52,96 | 47,04 |

Fonte: o autor.

Na Figura 6.4a destaca-se uma quantidade de falhas (vermelho) superior ao número de sucessos (azul), nas faixas TETRA DL, GSM 900 DL e DCS 1800 DL, que são as mais utilizadas do espectro.

Figura 6.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de média escala.

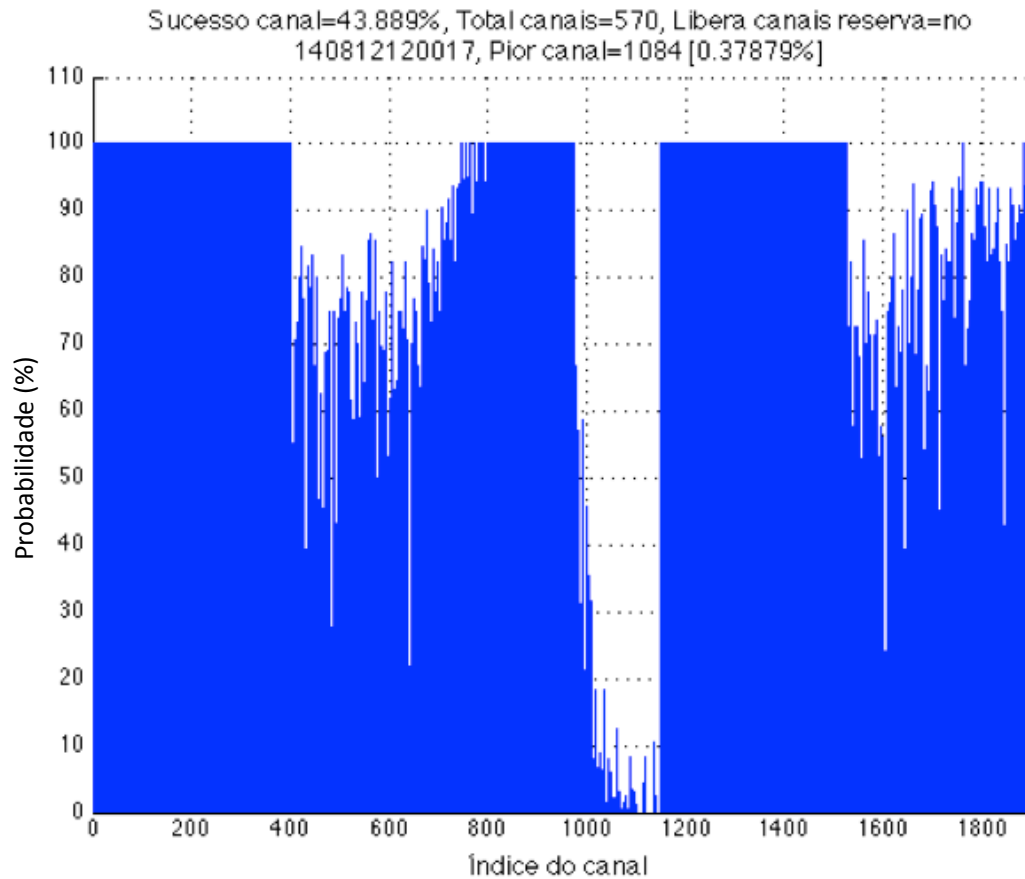
(a) Contadores de acesso aos canais.



A Figura 6.4b mostra que as piores probabilidades de sucesso de canal estão nas bandas com maior falhas na Figura 6.4a.

Figura 6.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de média escala.

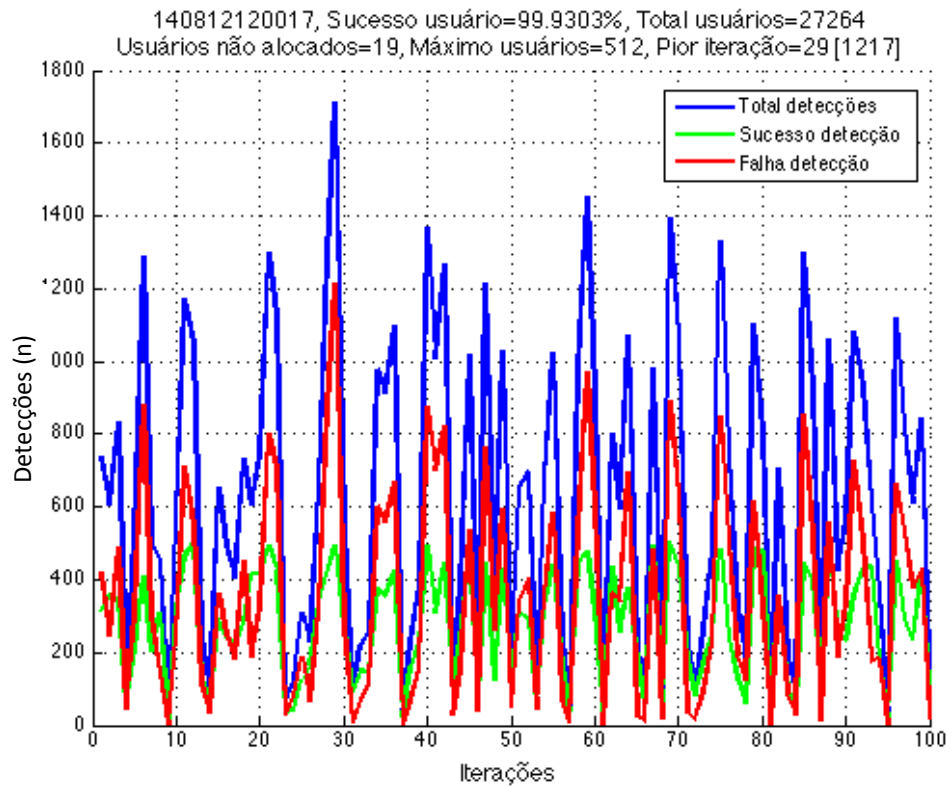
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



A Figura 6.4c mostra um aumento no número de detecções devido ao aumento nas falhas de acesso (vermelho).

Figura 6.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de média escala.

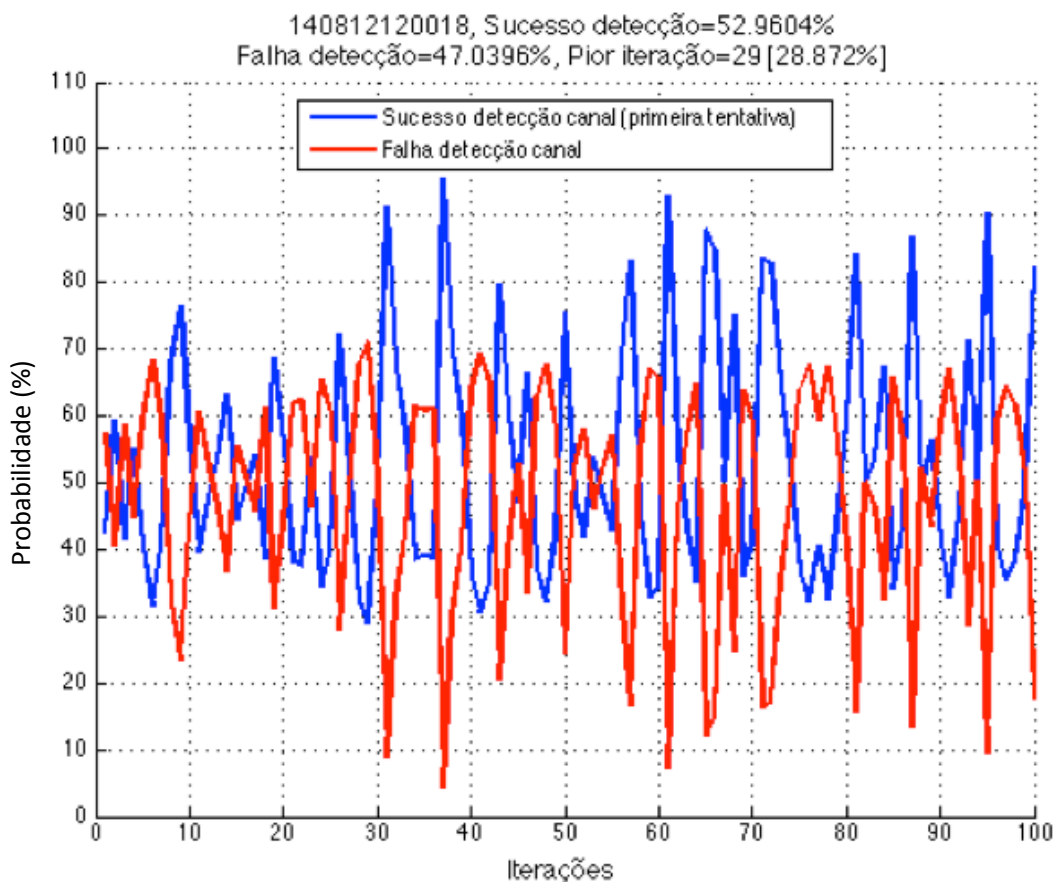
(c) Contadores de acesso do usuário.



A Figura 6.4d mostra uma queda na probabilidade de sucesso em relação ao Cenário 3, Figura 6.3d.

Figura 6.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de média escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

6.1.5 Cenário 5: Base de Dados Adaptativa

Neste cenário não há presença de uma base de canais com dados de predição, porém, através de interações com o Módulo de Detecção de Espectro (MDE), o Módulo de Administração do Espectro (MAE) constrói uma matriz de canais com base nas atualizações recebidas do MDE.

A Tabela 6.5 mostra os parâmetros de configuração utilizados e os resultados obtidos para o Cenário 5, com média escala. A Figura 6.5 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela 6.5 - Cenário 5 em situação de média escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | randômico | 100 | DB | sim | 570 | 0 | ligado |

(b) Resultados.

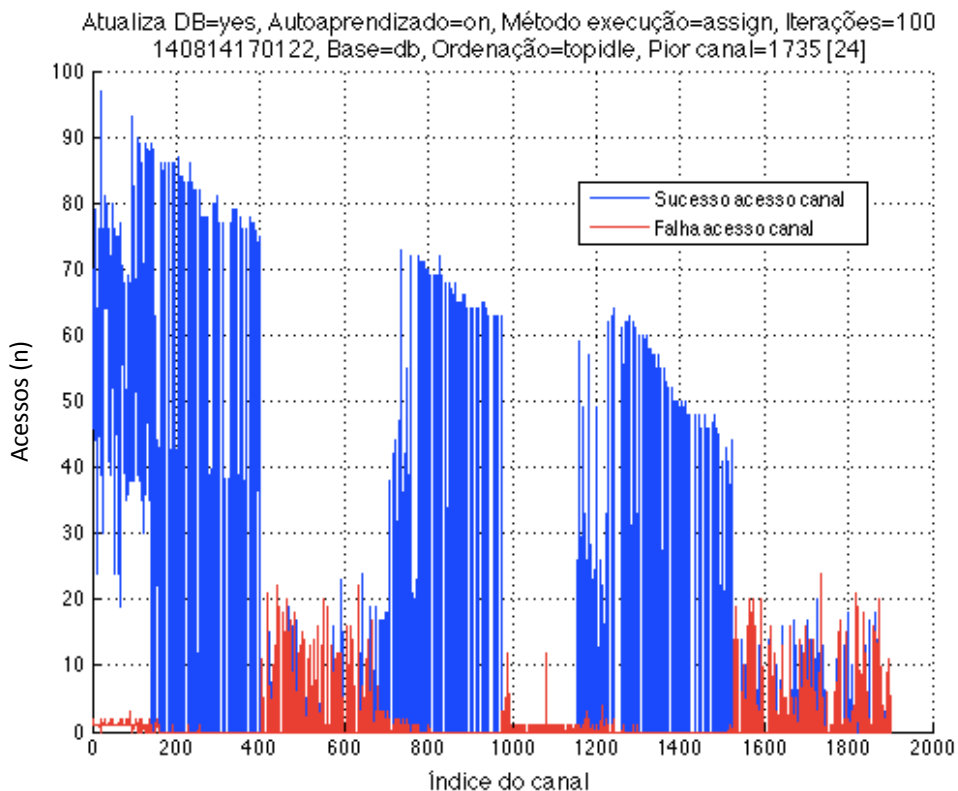
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 92,5 | 25376 | 0 | 100 | 95,16 | 4,84 |

Fonte: o autor.

A Figura 6.5a mostra a incidência de falhas em algumas faixas (vermelho). No entanto, não há um crescimento do acesso nessas faixas. A maior parte dos acessos com sucesso (azul) está nas faixas com menos falhas. Logo, fica demonstrado que o *Spectrum Manager* (SM) conseguiu identificar as faixas com menos utilização de forma autônoma.

Figura 6.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de média escala.

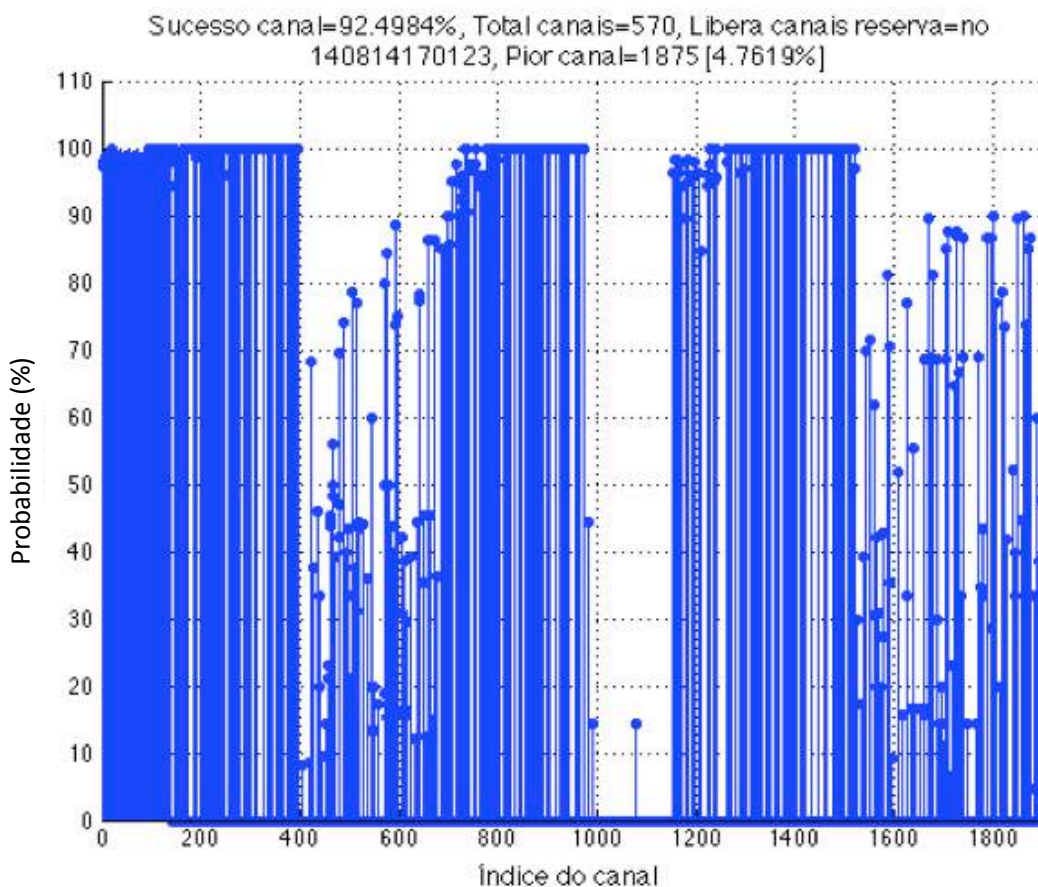
(a) Contadores de acesso aos canais.



Da mesma forma que nos outros cenários, a Figura 6.5b mostra que os canais com piores probabilidades estão nas faixas mais congestionadas do espectro.

Figura 6.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de média escala.

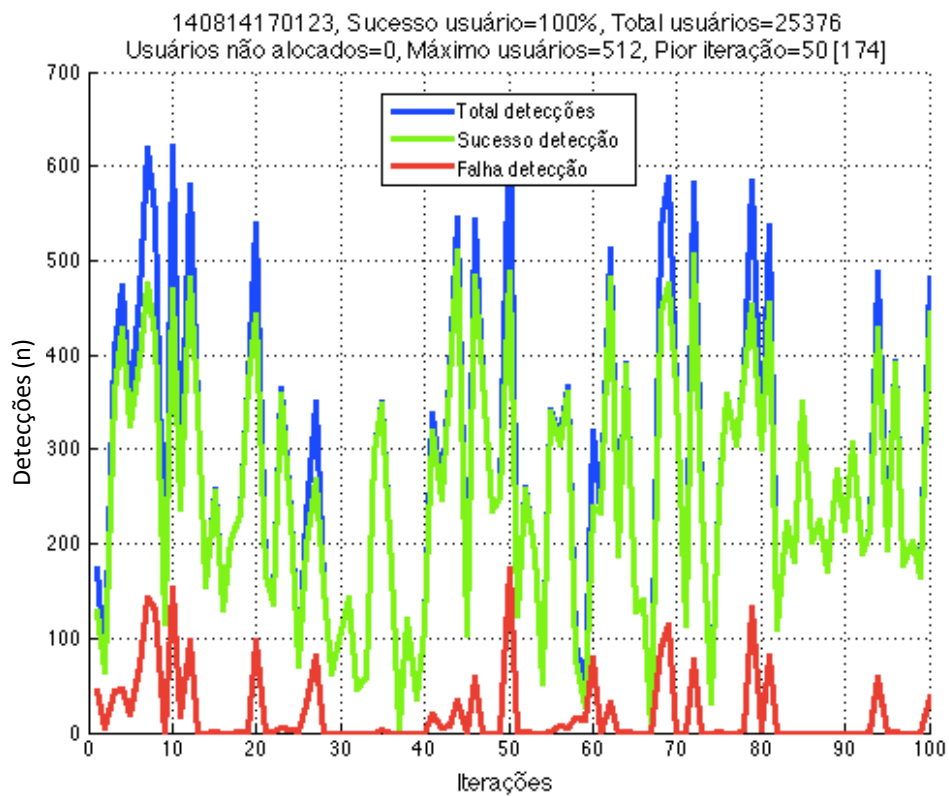
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Pela Figura 6.5c observa-se que quando o número de usuários é grande, conforme indica a curva verde, o número de falhas aumenta. Isto ocorre porque o número de canais disponíveis é 570 e, em algumas iterações, o número de usuários chega a 512, restando poucos canais para retentativa em caso de falha. Ainda assim, nesta simulação, todos os 25376 usuários foram alocados.

Figura 6.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de média escala.

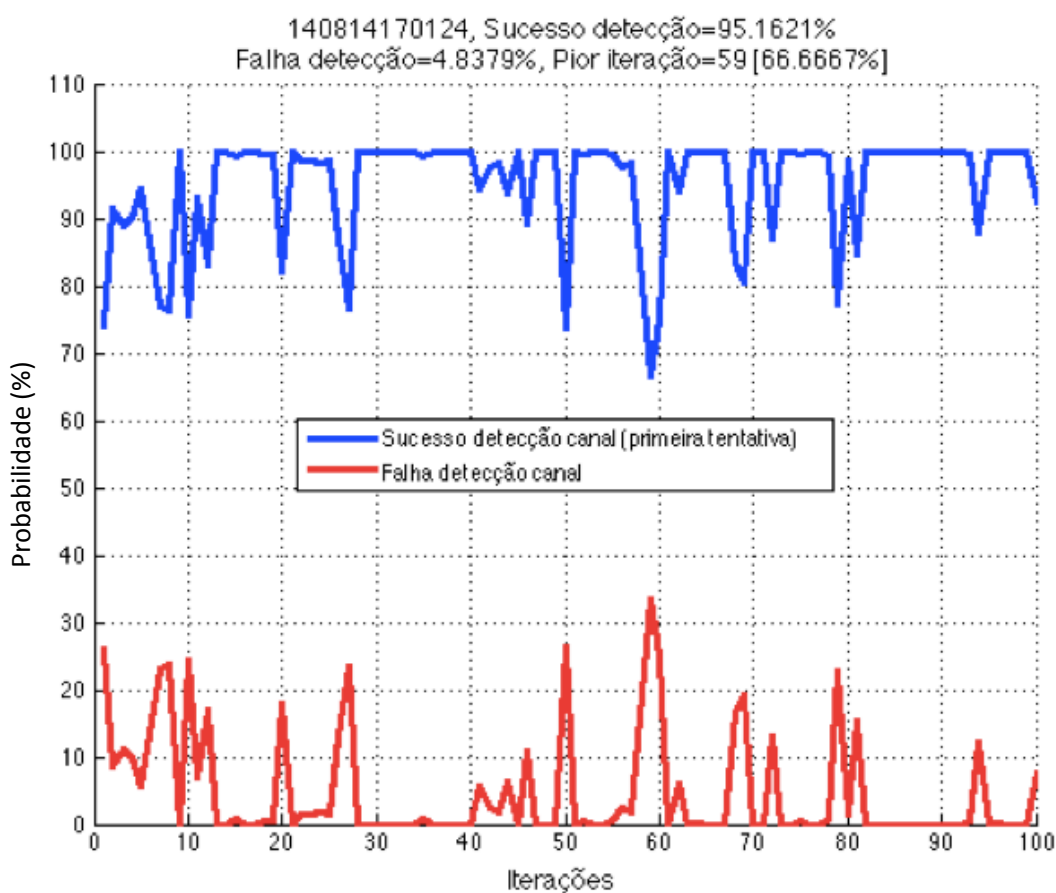
(c) Contadores de acesso do usuário.



A Figura 6.5d mostra que a probabilidade de sucesso de detecção ficou em 95,16%, mesmo sem a presença da base preditiva, apresentado sucesso inferior somente ao do Cenário 1. Nota-se também que, nas primeiras 10 iterações, a incidência de falhas (vermelho) é maior, pois o sistema ainda não tem conhecimento dos melhores canais da rede.

Figura 6.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de média escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

6.1.6 Análise dos Resultados: Cenários de 1 a 5

A Tabela 6.6 mostra um resumo dos resultados obtidos para os cinco cenários apresentados, considerando uma simulação de média escala.

Tabela 6.6 - Resultados dos cenários de 1 a 5 em situação de média escala.

| Cenário | Sucesso canal (%) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|---------|-------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 1 | 96,26 | 100 | 97,31 | 2,69 |
| 2 | 86,91 | 100 | 88,35 | 11,65 |
| 3 | 75,32 | 99,09 | 80,93 | 19,07 |
| 4 | 43,89 | 99,93 | 52,96 | 47,04 |
| 5 | 92,5 | 100 | 95,16 | 4,84 |

Fonte: o autor.

Pelos valores apresentados na Tabela 6.6 percebe-se que o Cenário 1 apresenta os melhores resultados em todos os indicadores.

É importante destacar na Tabela 6.6 que o Cenário 5 apresentou melhor resultado do que o Cenário 2. Isto demonstra a importância do caráter adaptativo da base de dados, uma vez que este não está presente no Cenário 2. Ainda assim, a simulação do Cenário 1 reforça que a combinação dos dois fatores (adaptabilidade e predição) é a que apresenta melhor resultado.

Os resultados do Cenário 2 comparados com os cenários 3 e 4, mostram que uso da predição tem importante papel no sistema proposto, pois apresentaram valores superiores em todos os indicadores.

6.1.7 Análise da Detecção de Canal

Nessa seção será avaliado o volume de detecções de espectro realizadas na rede nos diferentes cenários abordados. Com isso espera-se avaliar os métodos utilizados, identificando qual deles faz o menor número de detecções para alocação dos SUs.

Conforme visto no Capítulo 3, a ação de detecção de espectro parte de uma solicitação do *Spectrum Manager* (SM) ao *Spectrum Sensing Automaton* (SSA). Dependendo do cenário utilizado e da quantidade de usuários, isto pode gerar uma troca de informações intensa entre estes dois módulos. Além disso, um alto volume de detecções acarreta também em um alto tráfego de sinalização na CRN. Dessa forma, a situação ideal seria que, para cada usuário, fosse feita apenas uma detecção, o que implicaria numa condição de falha zero.

Para avaliação dessa simulação foram utilizados os cenários de 1 a 5, de acordo com os parâmetros da Tabela 6.7a. Note que foi utilizada uma quantidade

fixa de 512 usuários, para um espectro útil de 570 canais, nas cinco simulações. Com isso pode-se observar o comportamento de cada cenário numa situação de larga escala, sem a interferência da variável de número de usuários, a qual poderia dificultar a avaliação do resultado.

A Tabela 6.7b apresenta os resultados obtidos nesta simulação, onde *Usuários* indica o total de usuários da simulação, *Detecções* representa o total de detecções realizadas, *Detecções por iteração* representa a média de detecções por iteração, *Detecções por SU* indica a média de detecções por usuário e *Sucesso alocação SU* indica o percentual de usuários alocados ao final da simulação.

Tabela 6.7 - Simulação para avaliação de detecção de canal.

(a) Parâmetros de configuração.

| Cenário | Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|---------|----------|---------------|-----------|------------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 1 | 512 | fixo | 100 | DB | sim | 570 | 0 | desligado |
| 2 | 512 | fixo | 100 | DB | não | 570 | 0 | desligado |
| 3 | 512 | fixo | 100 | Sequencial | sim | 570 | 0 | desligado |
| 4 | 512 | fixo | 100 | Randômico | sim | 570 | 0 | desligado |
| 5 | 512 | fixo | 100 | DB | sim | 570 | 0 | ligado |

(b) Resultados de detecção.

| Cenário | Usuários | Detecções | Detecções por iteração | Detecções por SU | Sucesso alocação SU (%) |
|---------|----------|-----------|------------------------|------------------|-------------------------|
| 1 | 51200 | 56120 | 561,2 | 1,0961 | 100 |
| 2 | 51200 | 69365 | 693,65 | 1,3548 | 100 |
| 3 | 51200 | 73083 | 730,83 | 1,4274 | 93,37 |
| 4 | 51200 | 129579 | 1295,79 | 2,5308 | 98,23 |
| 5 | 51200 | 59897 | 598,97 | 1,1699 | 99,99 |

Fonte: o autor.

A Tabela 6.7b mostra um elevado número de detecções nos cenários 3 e 4, fazendo com que a média de detecções por usuário atingisse 2,53 para o Cenário 4. O melhor desempenho do Cenário 1 com 1,0961 detecções por SU, evidencia a importância da combinação dos dois fatores propostos para alocação de canais: dados de predição e base de dados adaptativa. No Cenário 2, onde a base não é adaptativa, foram necessárias 13245 detecções a mais do que o Cenário 1, para alocar a mesma quantidade de usuários. No Cenário 5, onde não existem dados de predição, foram necessárias 3777 detecções a mais do que o Cenário 1, para alocar a mesma quantidade de usuários.

Comparando os cenários 2 e 5, nota-se que o fator adaptativo tem maior peso do que os dados de predição, pois o Cenário 2 precisou de 9468 detecções a mais que o Cenário 5, para alocar a mesma quantidade de SUs.

Dessa forma, os resultados apresentados na Tabela 6.7b mostram que o sistema proposto, representado pelo Cenário 1, apresenta uma redução significativa no número de detecções na rede, diminuindo a troca de informações entre o SM e o SSA e, por consequência, reduzindo o tráfego de sinalização na rede.

As simulações utilizadas para avaliação nesta seção utilizam as mesmas configurações das simulações presentes no Apêndice H. Entretanto, os gráficos utilizados especificamente para esta seção estão disponíveis no Apêndice I.

6.2 Experimentos

Nesta seção são avaliados aspectos importantes do Cenário 1, que representa o sistema proposto. Para isso, foram realizados dois experimentos para avaliação do sistema desenvolvido diante de situações específicas em uma CRN.

Primeiramente será avaliado o desempenho do Cenário 1 na presença de usuários de QoS, que são SUs que ocupam sequências de canais disponíveis no espectro, a fim de obter uma largura de banda superior à dos canais utilizados pelos demais SUs.

O segundo experimento permite avaliar o acesso oportunístico realizado pela metodologia proposta, baseado nos percentuais de sucesso e falha de alocação de SUs, nas bandas de *downlink* e *uplink* do espectro de interesse (TETRA, GSM 900 e DCS 1800).

6.2.1 Cenário 6: Usuários de QoS

No Cenário 6 são avaliados os resultados das simulações com a presença de usuários que precisam de requisitos de QoS. No presente trabalho demandas de QoS serão tratadas como necessidade de banda adicional à proporcionada pelo canal de 200 kHz dos sistemas GSM/DCS. Assim, sequências de canais serão alocadas para estes usuários, conforme disponibilidade no espectro. Para estas

simulações, um percentual de 20% do total de usuários serão considerados SUs que necessitam de banda adicional.

Na tabela de resultados para este cenário, foram adicionados os seguintes indicadores:

Total usuários QoS: representa o número de SUs com demanda de QoS ao final de todas iterações.

Usuários QoS não alocados: indica o número de usuários não alocados ao final de todas iterações, devido à falta de sequências no espectro.

Sucesso usuário QoS: representa a probabilidade de sucesso de alocação de SUs de QoS na rede, dado pela Equação 6.5.

$$\text{Sucesso usuário QoS} = 100 * \frac{\text{Total usuários QoS} - \text{Usuários QoS não alocados}}{\text{Total usuários QoS}} \quad (6.5)$$

Sucesso detecção QoS: indica a probabilidade de sucesso de detecção do canal de QoS, na primeira tentativa. É definido pela Equação 6.6.

$$\text{Sucesso detecção QoS} = 100 * \frac{\text{Sucessos detecção sequência}}{\text{Sucessos detecção sequência} + \text{Falhas detecção sequência}} \quad (6.6)$$

Onde Sucessos detecção sequência representa a soma do número de alocações de SUs de QoS com sucesso e, Falhas detecção sequência representa a soma do número de alocações de SUs de QoS com falha, em todas as iterações.

Falha detecção QoS: indica a probabilidade de falha de detecção do canal de QoS. É definido pela Equação 6.7.

$$\text{Falha detecção QoS} = 100 * \frac{\text{Falhas detecção sequência}}{\text{Sucessos detecção sequência} + \text{Falhas detecção sequência}} \quad (6.7)$$

De forma similar às seções anteriores deste capítulo, aqui é feita uma análise do desempenho da rede com a presença de usuários com demanda de QoS, em cenários de média escala. As simulações com pequena e larga escala estão disponíveis nos apêndices G e H, respectivamente.

Para avaliação do Cenário 6, os seguintes campos foram adicionados às tabelas de resultados:

Total SU comum: representa o número de SUs comuns na rede, ou seja, que não demandam QoS.

SU comum não alocado: indica o número de SUs comuns que não conseguiram acessar a rede.

Total SU QoS: representa o número de SUs de QoS que tentaram acessar a rede.

SUs QoS não alocado: indica o número de SUs de QoS que não conseguiram acessar a rede.

Sucesso SU QoS: representa o percentual de sucesso na alocação de SUs de QoS na rede.

Neste cenário são apresentados os resultados da simulação que consideram a presença de usuários de QoS em uma rede de média escala. O método para alocação de usuários comuns neste cenário é o mesmo apresentado no Cenário 1, ou seja, utilizando uma base de dados preditiva adaptativa.

Da mesma forma que nos outros cenários abordados até aqui, em cada iteração, um número que pode variar de 1 a 512 SUs acessam a rede. Destes, um percentual de 20% são usuários de QoS, sendo que o número de canais disponíveis é 570. A Tabela 6.8 mostra os parâmetros de configuração utilizados na simulação, bem como os resultados obtidos. A Figura 6.6 mostra os gráficos dos resultados.

Tabela 6.8 - Cenário 6 em situação de média escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | randômico | 100 | DB | sim | 570 | 102 | desligado |

(b) Resultados.

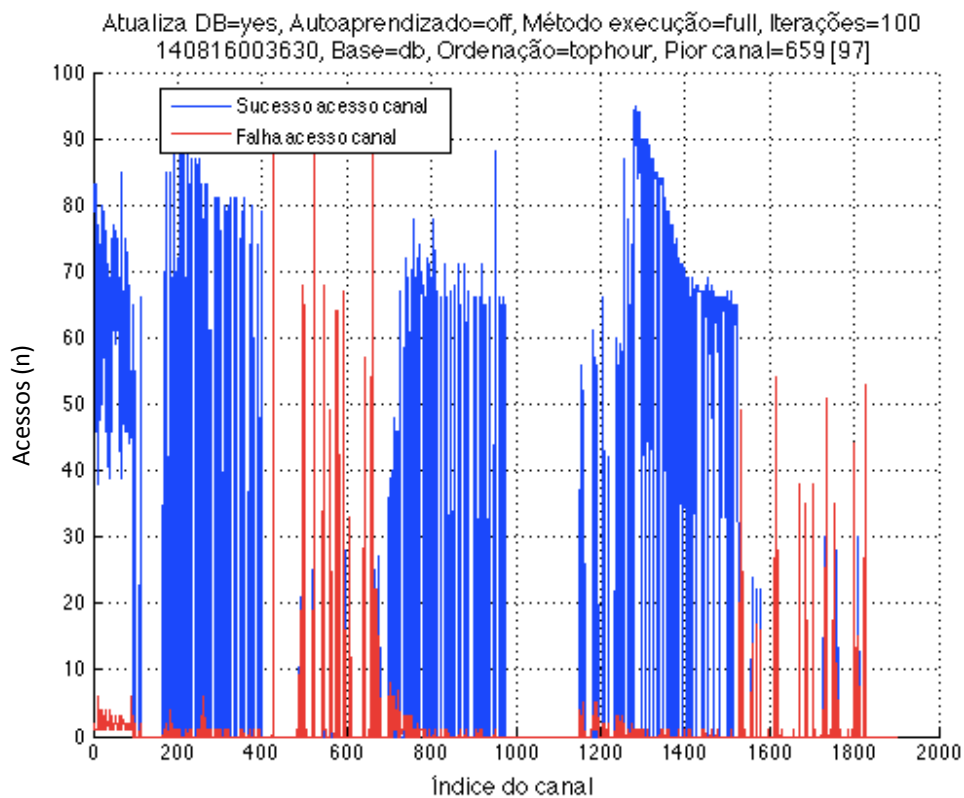
| Sucesso canal (%) | Total SU comum (n) | SU comum não alocado (n) | Sucesso SU comum (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) | Total SU QoS (n) | SU QoS não alocado (n) | Sucesso SU QoS (%) | Sucesso detecção QoS (%) | Falha detecção QoS (%) |
|-------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|
| 93,3 | 19799 | 3166 | 84,01 | 94,84 | 5,16 | 4950 | 1824 | 63,15 | 97,61 | 2,39 |

Fonte: o autor.

A Figura 6.6a mostra que houve um aumento nos acessos nas faixas mais congestionadas e um consequente aumento na ocorrência de falhas (vermelho). Isto se explica pela alocação de sequências no espectro, que não faz distinção de faixas para alocação de SUs de QoS. Se este fator fosse considerado, o número de sequências disponíveis seria ainda menor.

Figura 6.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de média escala.

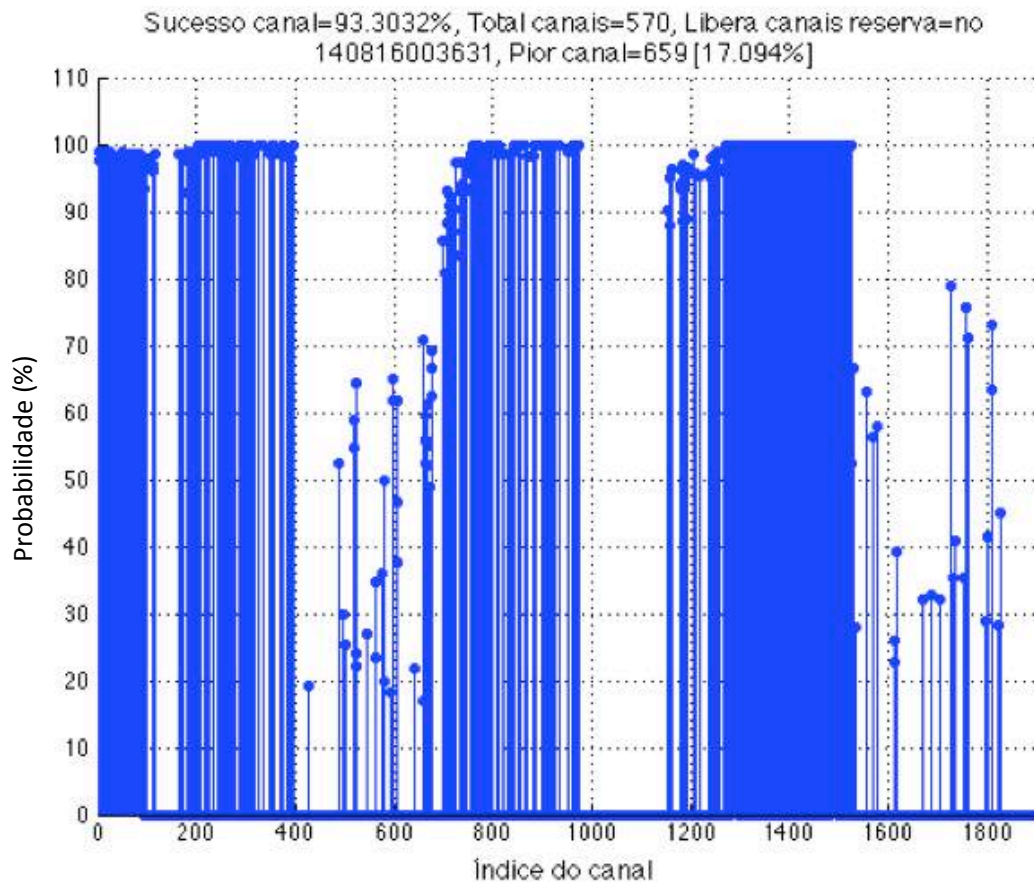
(a) Contadores de acesso aos canais.



A Figura 6.6b mostra a queda na probabilidade de sucesso dos canais das bandas com maior quantidade de falhas na Figura 6.6a.

Figura 6.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de média escala.

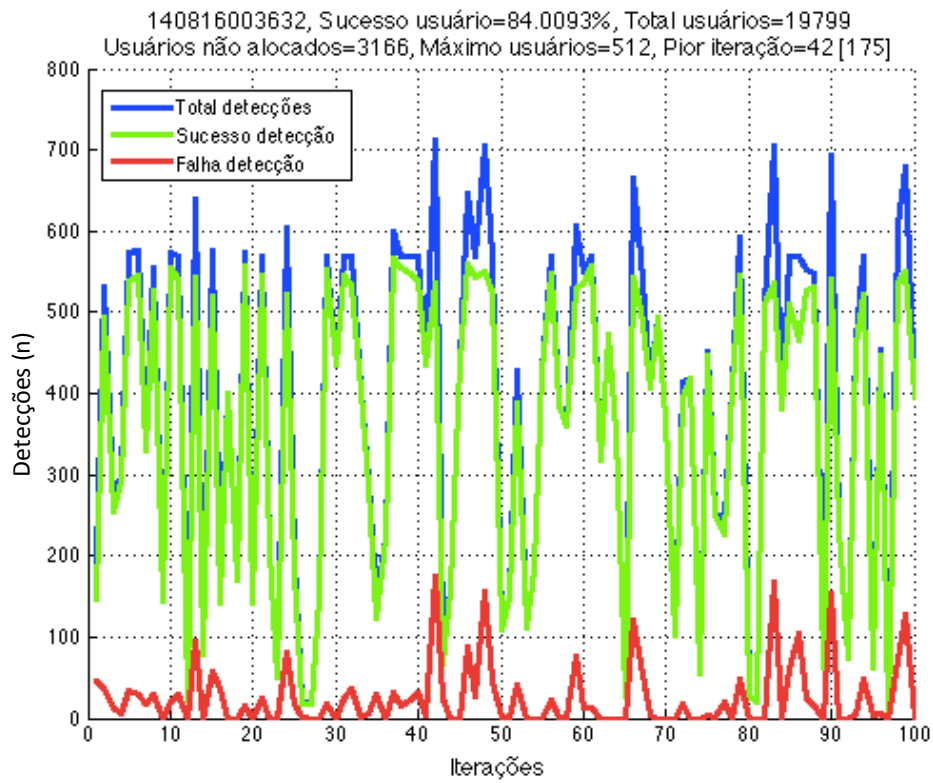
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Na Figura 6.6c percebe-se um aumento na incidência de falhas de detecção (vermelho) em relação à Figura 6.1c, devido à presença de usuários de QoS.

Figura 6.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de média escala.

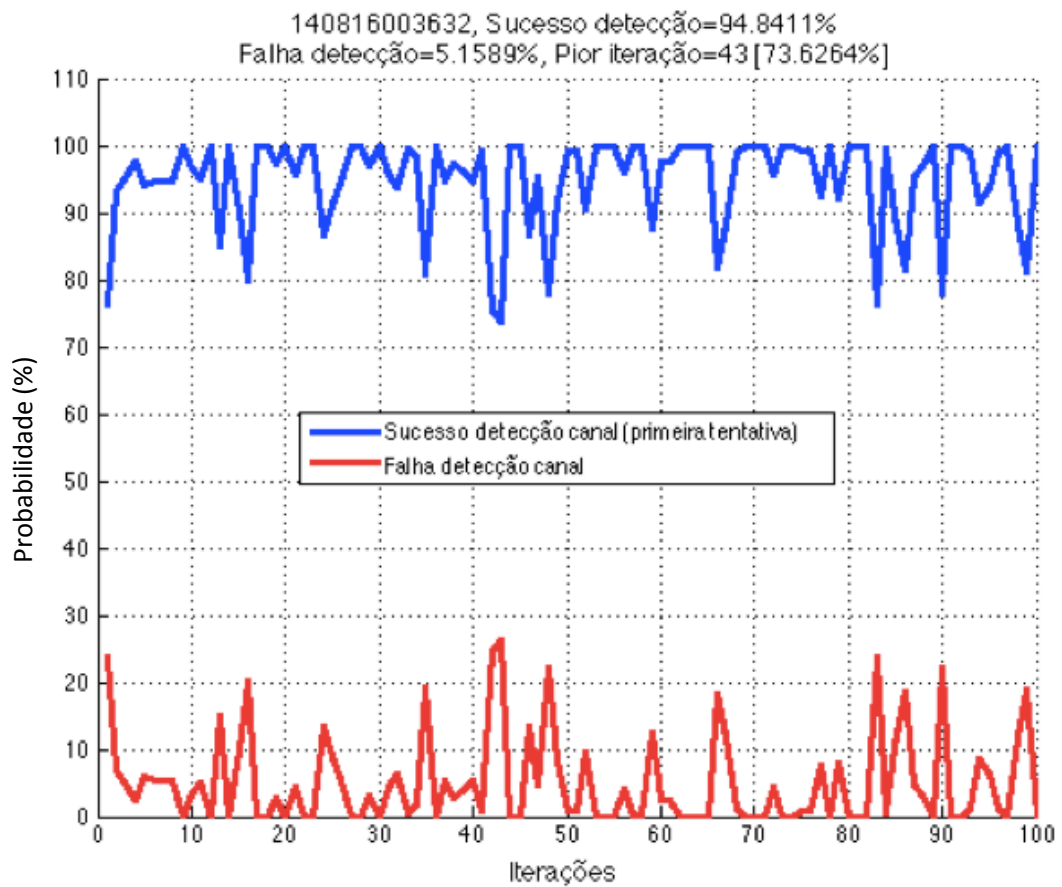
(c) Contadores de acesso do usuário.



A Figura 6.6d mostra uma queda no sucesso de detecção em comparação com o Cenário 1, devido à presença de usuários de QoS e o aumento do número de detecções na rede.

Figura 6.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de média escala.

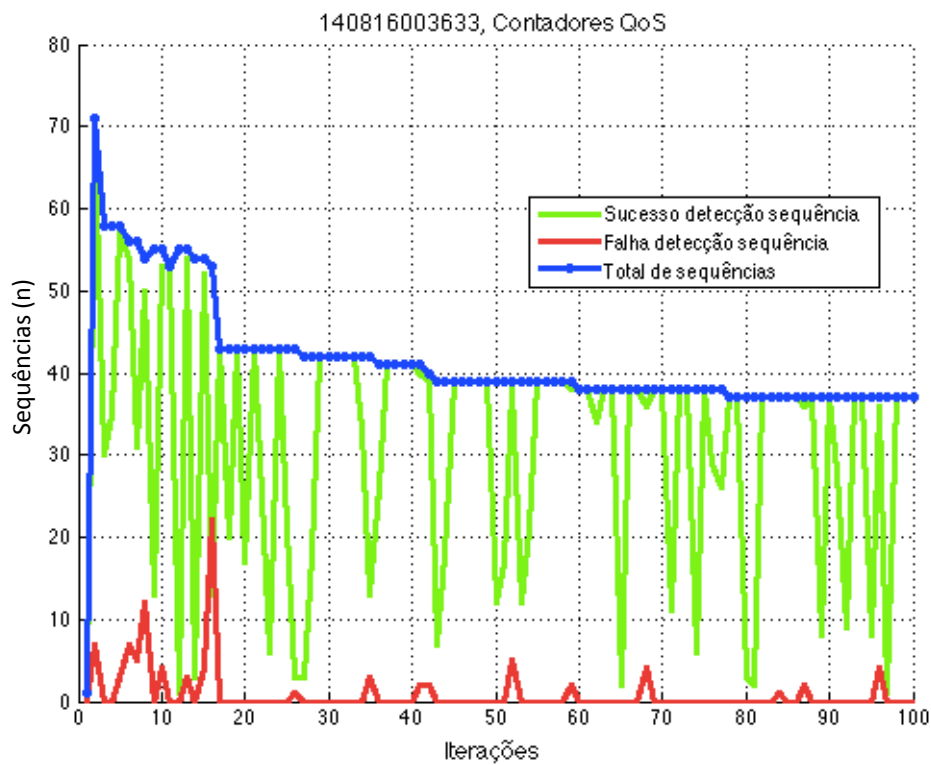
(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



A Figura 6.6e mostra que houve uma redução no número de sequências pouco antes da iteração 20 (azul), o que acabou causando um pico de ocorrência de falhas (vermelho).

Figura 6.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de média escala.

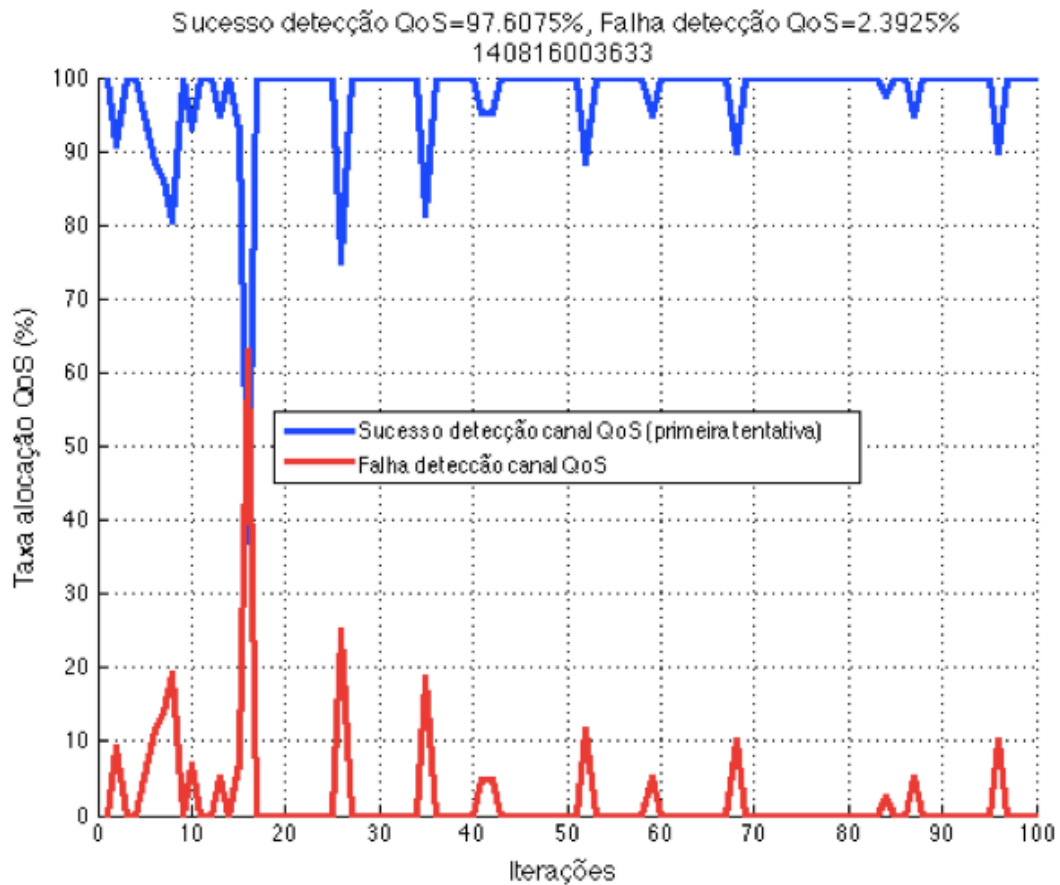
(e) Contadores de QoS.



A Figura 6.6f mostra que o pico de falhas pouco antes da iteração 20 coincide com a redução no número de sequências indicado na Figura 6.6e. Ainda assim, a probabilidade de sucesso na detecção de canais de QoS apresentou média de 97,61%.

Figura 6.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de média escala.

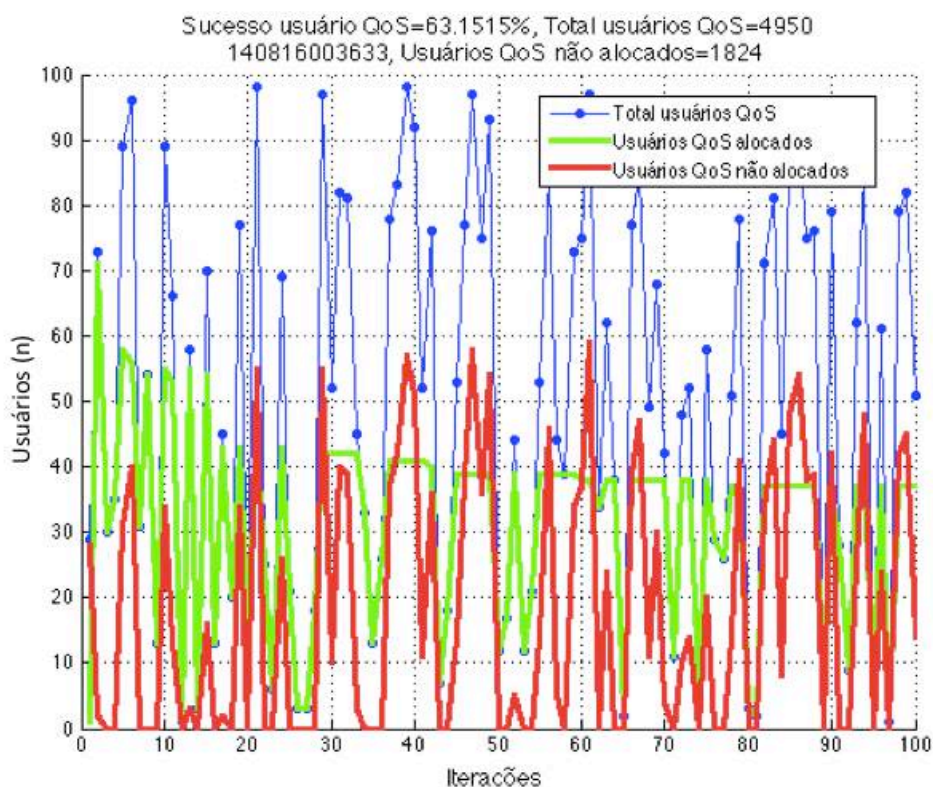
(f) Probabilidade de sucesso na detecção de canal de QoS.



A Figura 6.6g mostra que os picos de falhas (vermelho) coincidem com o aumento de usuários de QoS (azul).

Figura 6.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de média escala.

(g) Usuários de QoS.



Fonte: o autor.

6.2.2 Análise de Resultados: Cenário 6

A Tabela 6.9 apresenta os resultados das simulações do Cenário 1 e Cenário 6, para comparação dos resultados considerando a presença de SUs de QoS.

Tabela 6.9 - Resultados das simulações dos cenários 1 e 6.

| Cenário | Sucesso canal (%) | Total SU comum (n) | SU comum não alocado (n) | Sucesso SU comum (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) | Total SU QoS (n) | SU QoS não alocado (n) | Sucesso SU QoS (%) | Sucesso detecção QoS (%) | Falha detecção QoS (%) |
|---------|-------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|
| 6 | 93,3 | 19799 | 3166 | 84,01 | 94,84 | 5,16 | 4950 | 1824 | 63,15 | 97,61 | 2,39 |
| 1 | 96,26 | 25459 | 0 | 100 | 97,31 | 2,69 | n/a | n/a | n/a | n/a | n/a |

Fonte: o autor.

Conforme pode ser observado na Tabela 6.9, o indicador *Sucesso canal* ficou em 93,3% para o Cenário 6, enquanto na simulação do Cenário 1 apresentou 96,26%. O indicador *Sucesso detecção* apresentou queda de 97,31% no Cenário 1, para 94,84% no Cenário 6. Com base nesses resultados, pode-se concluir que a alocação de SUs comuns é afetada pela presença de usuários de QoS. Porém, apesar do indicador *Total SU comum* sofrer uma redução no número de SUs, deve-se lembrar que os SUs de QoS precisam realizar mais detecções para alocar uma sequência. Assim, no caso de uma mínima sequência formada por dois canais e sendo alocada com sucesso, o número de detecções deve ser igual a dois. Já para um SU comum, apenas uma seria necessária, uma vez que este tipo de usuário usa somente um canal por vez.

Ainda na Tabela 6.9, nota-se que os indicadores *Sucesso SU comum* e *Sucesso SU QoS* sofrem redução em seus valores, devido à presença dos usuários de QoS. Os SUs comuns, em especial, são bastante afetados pela ocupação das sequências de canais no espectro, chegando a 84,01% de usuários alocados e 3166 rejeições de conexão. Devido à característica especial dos usuários de QoS, que necessitam de sequências livres no espectro, seu índice dificilmente vai atingir valores parecidos com os dos SUs comuns. Nessa simulação, o indicador *Sucesso SU QoS* ficou em 63,15%.

A alocação de SUs de QoS é prioritária em relação a alocação de SUs comuns. Assim, já esperava-se que os SUs de QoS afetassem o desempenho da rede como um todo. Em função da imprevisibilidade da disponibilidade de sequências no espectro, também era previsto que o indicador *Sucesso SU QoS* não atingisse índices elevados. As quedas em indicadores como *Sucesso SU comum* e *Sucesso SU QoS* se justificam por não haver canais livres disponíveis para alocação desses usuários. Nesse tipo de situação, a *Base Station* rejeita tais usuários impedindo que os mesmos se registrem na rede. Ainda assim, os resultados apresentados pelos indicadores *Sucesso detecção* e *Sucesso detecção QoS*, demonstram o bom desempenho do método proposto neste trabalho.

Com base nos resultados obtidos para o Cenário 6, conclui-se que a melhor condição para atendimento de SUs de QoS seria numa situação de pequena escala, com alta disponibilidade de espectro. A simulação com baixa demanda foi a única que conseguiu alocar 100% dos usuários comuns na presença de SUs de QoS, e foi

a que apresentou melhor desempenho do indicador *Sucesso SU QoS* com 86,75%, conforme apresentado no Apêndice G. Nos demais cenários, com simulação de larga escala (Apêndice H) e média escala (nesta seção), os SUs comuns foram impactados pela presença de usuários de QoS, conforme mostram os indicadores da Tabela 6.9. Além disso, o indicador *Sucesso SU QoS* nestes cenários foi inferior ao cenário de pequena escala.

6.2.3 Análise da Alocação do Espectro

Nesta seção será avaliado de que forma o espectro é alocado durante as simulações com o Cenário 1. Conforme visto no Capítulo 3, as faixas menos utilizadas do espectro de interesse são a TETRA UL, GSM 900 UL e DCS 1800 UL. Em relação ao espectro total de 1900 canais, estas faixas representam, respectivamente, 21,05%, 9,21% e 19,74% dos canais disponíveis.

Para avaliação dos resultados serão utilizados dois cenários de larga escala: um com 512 canais no espectro útil e outro 950 canais. Ambos serão detalhados a seguir.

6.2.3.1 Espectro Útil de 512 Canais

As tabelas 6.10a e 6.10b apresentam, respectivamente, os parâmetros de configuração e resultados da simulação para o Cenário 1, considerando uma situação de larga escala e espectro útil de 512 canais.

A Tabela 6.10c detalha o percentual de canais alocados em cada banda. Assim, o indicador *Sucesso* indica quanto aquela faixa representa em relação a todos os acessos com sucesso do espectro. De forma semelhante, o indicador *Falha* informa quanto aquela faixa contribui em relação ao total de falhas de alocação do espectro. Portanto, para calcular o sucesso dos canais da faixa TETRA UL, por exemplo, soma-se os contadores de sucesso dos canais de 1 a 400, conforme Tabela 5.1, e divide-se pelos contadores de sucesso dos canais de 1 a 1900.

Tabela 6.10 - Análise do espectro com larga escala e espectro útil de 512 canais.

(a) Parâmetros de configuração.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | fixo | 100 | DB | sim | 570 | 0 | desligado |

(b) Resultado dos indicadores.

| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 95,61 | 51200 | 0 | 100 | 96,68 | 3,33 |

(c) Resultado da alocação do espectro.

| Alocação do espectro | | | | | | |
|----------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Indicador | TETRA UL (%) | TETRA DL (%) | GSM 900 UL (%) | GSM 900 DL (%) | DCS 1800 UL (%) | DCS 1800 DL (%) |
| Sucesso | 33,27 | 10,93 | 6,84 | 0 | 48,86 | 0,11 |
| Falha | 24,77 | 58,09 | 0 | 0 | 4,26 | 12,89 |

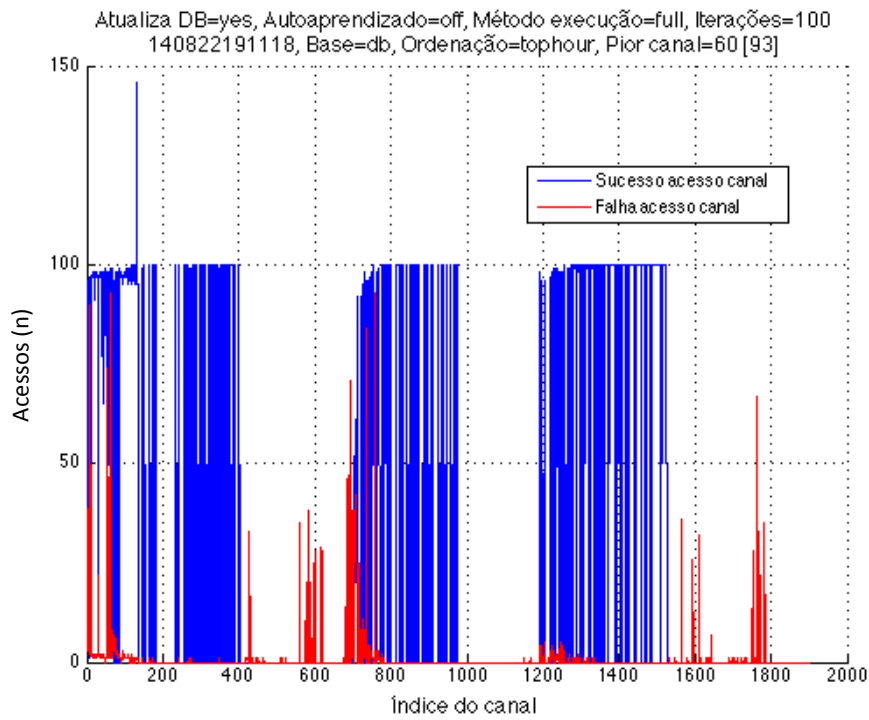
Fonte: o autor.

Nota-se na Tabela 6.10c que o maior sucesso foi na faixa DCS 1800 UL com 48,86%. A Tabela 4.1 mostra que, em termos de DC médio, a DCS 1800 UL e a GSM 900 UL possuem o mesmo valor, ou seja, 0,02. Porém, enquanto a primeira possui 375 canais em sua faixa (Tabela 5.1), o GSM 900 UL possui somente 175 canais. Isto explica a maior utilização da faixa DCS 1800 UL. A segunda faixa mais utilizada foi a TETRA UL, que possui DC médio de 0,03 e 400 canais.

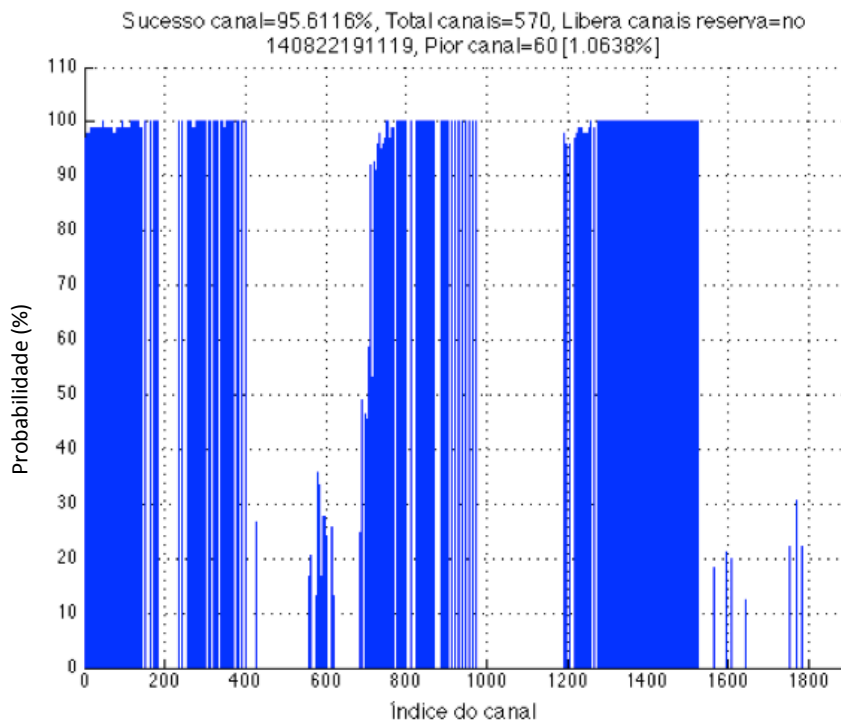
Também chama a atenção na Tabela 6.10c, a utilização de 10,93% na faixa TETRA DL que ultrapassa a GSM 900 UL, que teve 6,84% das alocações de canal. Semelhante ao caso do DCS 1800 UL, a TETRA DL apresenta 400 canais. Dessa forma, acaba sendo mais utilizada que a GSM 900 UL, mesmo tendo um DC médio de 0,36. No entanto, apesar de 10,93% das alocações com sucesso terem se concentrado na TETRA DL, foi nela onde proporcionalmente se concentrou a maior incidência de falhas de alocação. Este comportamento pode ser observado na Figura 6.7a, especificamente nas linhas vermelhas entre os índices de canais de 400 a 800. Na Figura 6.7b pode-se verificar que os canais desta faixa possuem probabilidade de sucesso menor do que a média global que é 95,61%.

Figura 6.7 - Estatísticas de acesso para uma simulação de larga escala e espectro útil de 512 canais.

(a) Contadores de acesso aos canais.



(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Fonte: o autor.

De forma geral a alocação dos canais ficou dentro do esperado, especialmente porque as faixas mais congestionadas do espectro foram muito pouco acessadas. No caso da faixa GSM 900 DL, que é a mais congestionada com DC médio igual a 0,96, não houve nenhum acesso. Já a faixa DCS 1800 DL, que é a segunda mais congestionada com DC médio de 0,44, concentrou apenas 0,11% dos acessos.

6.2.3.2 Espectro Útil de 950 Canais

As tabelas 6.11a e 6.11b apresentam, respectivamente, os parâmetros de configuração e resultados da simulação para o Cenário 1, numa situação de larga escala e espectro útil de 950 canais.

Considerando a presença de 900 usuários, nesta situação é possível avaliar o comportamento do sistema utilizando um espectro útil equivalente à soma dos canais das bandas TETRA UL, GSM 900 UL e DCS 1800 UL e metade do espectro de interesse.

Tabela 6.11 - Análise do espectro com larga escala e espectro útil de 950 canais.

(a) Parâmetros de configuração.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 900 | fixo | 100 | DB | sim | 950 | 0 | desligado |

(b) Indicadores.

| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 95,4 | 90000 | 0 | 100 | 95,79 | 4,21 |

(c) Alocação das bandas.

| Alocação do espectro | | | | | | |
|----------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Indicador | TETRA UL (%) | TETRA DL (%) | GSM 900 UL (%) | GSM 900 DL (%) | DCS 1800 UL (%) | DCS 1800 DL (%) |
| Sucesso | 34,54 | 12,25 | 16,56 | 0 | 34,55 | 2,11 |
| Falha | 3,32 | 57,8 | 0,11 | 0 | 3,62 | 35,15 |

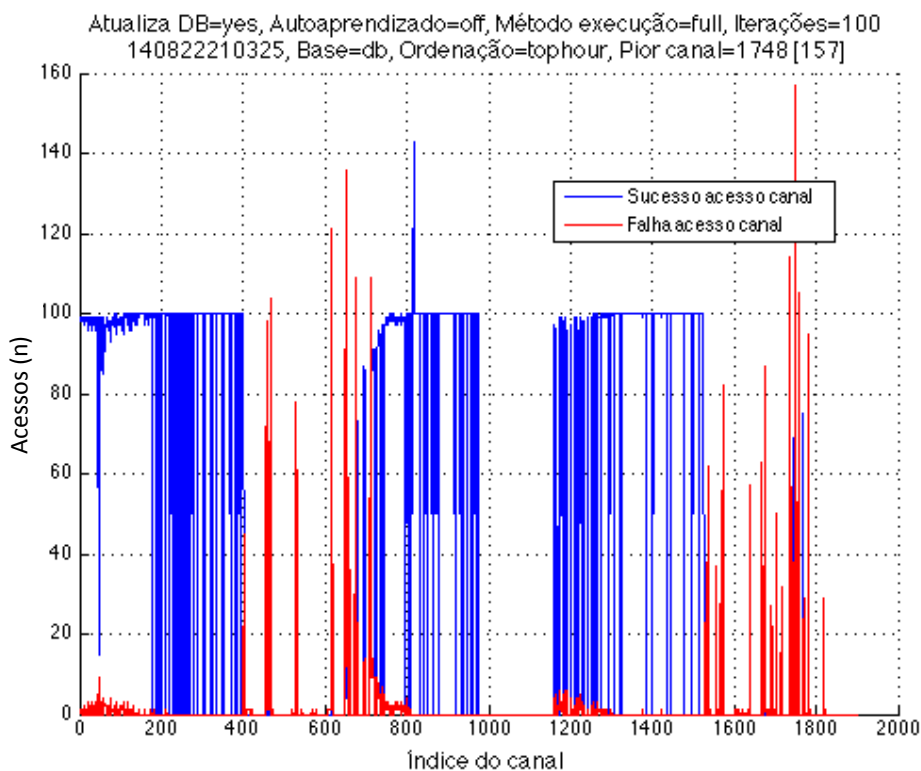
Comparando os valores das tabelas 6.11b e 6.10b, nota-se que não ocorreram mudanças significativas para os indicadores de detecção, canal e usuário. Entretanto, nas alocações do espectro indicadas na Tabela 6.11c observa-se que a

as faixas DCS 1800 UL e TETRA UL tiveram utilização praticamente igual. Já a banda GSM 900 UL teve maior utilização que a TETRA DL, ao contrário do que mostra a Seção 6.2.3.1. Isto ocorreu porque o número de usuários acessando a rede aumentou de 512 para 900, em comparação com o cenário simulado na Seção 6.2.3.1, causando um aumento na demanda de canais. A faixa GSM 900 DL, semelhante ao ocorrido na Seção 6.2.3.1, não teve nenhum acesso.

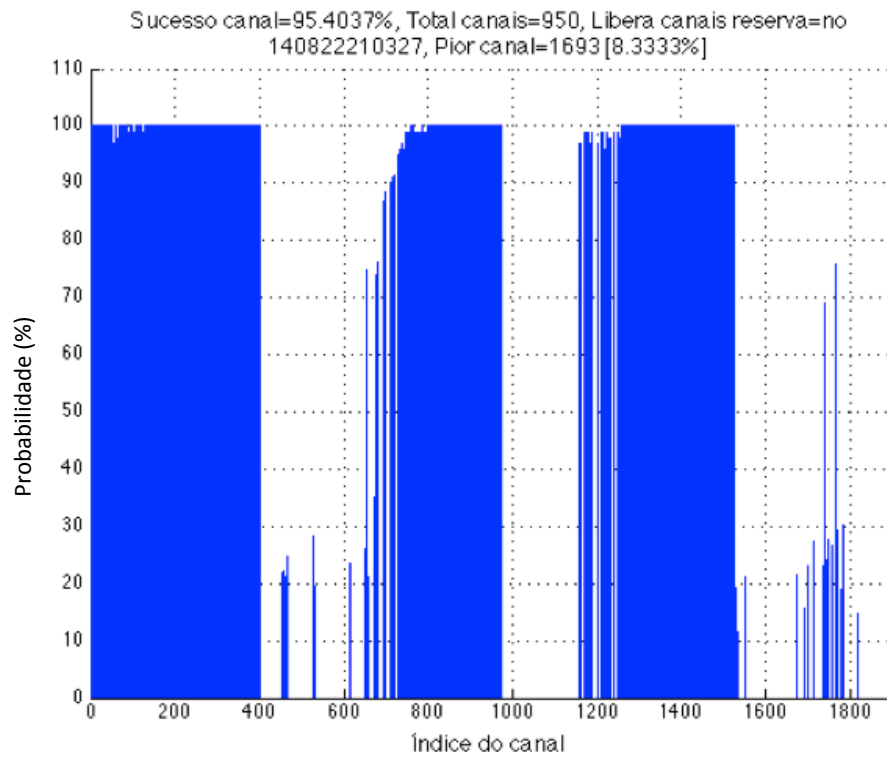
As falhas de alocação ficaram concentradas nas faixas TETRA DL e DCS 1800 DL com, respectivamente, 57,8% e 35,15%. Estas faixas são as mais congestionadas, depois da GSM 900 DL, com DC médio igual a 0,36 e 0,44, respectivamente. Este comportamento pode ser observado na Figura 6.8a, onde as linhas vermelhas com maior valor se concentram nos intervalos de índices de 401 a 800 e 1526 a 1900, que correspondem, respectivamente, às faixas TETRA DL e DCS 1800 DL. Na Figura 6.8b pode-se observar que os canais destas faixas têm probabilidade de sucesso abaixo da média global dos canais que é 95,4%.

Figura 6.8 - Estatísticas de acesso para uma larga escala e espectro útil de 950 canais.

(a) Contadores de acesso aos canais.



(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Fonte: o autor.

7 Conclusão

Em 1968 o ecologista Garret Hardin escreveu um influente artigo intitulado *The Tragedy of the Commons* (HARDIN, 1968). Nele o autor trata sobre um dilema onde vários indivíduos, agindo de forma racional e por conta própria, consomem determinado recurso de uso coletivo até seu esgotamento completo. Nem mesmo o fato dos indivíduos não desejarem o fim de tal recurso é suficiente para impedir o esgotamento do mesmo. Esta teoria é constantemente utilizada em problemas relacionados a áreas como economia e ecologia. No entanto, sua aplicação na abordagem do problema da utilização do espectro de frequências é extremamente pertinente (WYGLINSKI; NEKOVEE; HOU, 2010). No cenário atual, onde as demandas de capacidade de dados são cada vez maiores, a teoria de rádios cognitivos pode ser vista como uma alternativa para utilização do espectro de RF de forma mais racional.

Num artigo publicado em 2013, McLeod utiliza um título bastante interessante e oportuno no contexto do presente trabalho: "*How 'white spaces' could change the world*" (MCLEOD, 2013). Neste artigo são destacados projetos piloto sendo realizados pelo Google na Cidade do Cabo e pela Microsoft no Quênia e Tanzânia. Nesses projetos, as duas empresas fazem grandes investimentos em tecnologias de CR para utilização de *white spaces* nas bandas de TV. Com o uso dos espaços nas bandas licenciadas, a Microsoft estima que o custo para entrega de um serviço sem fio com taxa de 2 Mbps pode chegar a US\$ 1,50 por mês, por usuário. Atualmente, um acesso similar utilizando banda larga fixa custa em torno de US\$ 113,00 (ORANGE KENYA, 2014). Dessa forma, o acesso ao espectro licenciado, através da tecnologia de rádios cognitivos, dá um grande passo ao mobilizar grandes empresas de tecnologia, dispostas a investir no uso do espectro licenciado para prover serviços de melhor qualidade, a um custo mais baixo para o usuário.

No Brasil observam-se movimentações com o intuito de desocupar o espectro na faixa de 700 MHz (de 698 MHz a 806 MHz), hoje utilizado por emissoras de TV analógicas. A liberação completa desta banda está prevista para 2017 e, com

esta ação, será possível utilizar a faixa de 700 MHz para redes celulares de quarta geração que usam tecnologia LTE (ANATEL, 2013). No entanto, este tipo de decisão não garante um uso mais racional do espectro de RF. Para isso, os modelos de licenciamento do espectro precisam ser reavaliados pelos órgãos governamentais, a fim de propiciar um uso mais adequado deste valioso recurso natural.

No presente trabalho, alguns dos principais conceitos de rádios cognitivos foram aplicados no desenvolvimento de um sistema de simulação, capaz de executar funções de gerenciamento de espectro e alocação de canais em uma rede de rádios cognitivos. A norma IEEE 802.22 é utilizada como uma das principais referências nas etapas de desenvolvimento, definições e delimitações deste trabalho. Apesar da IEEE 802.22 considerar a utilização das bandas VHF e UHF para uso de *cognitive radio* (CR), no sistema desenvolvido é proposta uma extensão desta norma, considerando também o acesso oportunístico às bandas TETRA, GSM 900 e DCS 1800, comumente utilizadas em zonas urbanas.

A metodologia apresentada propõe um método de gerenciamento de alocação de canais que utiliza uma base de dados preditiva e adaptativa, priorizando os canais com maior probabilidade de estarem livres e aqueles com maior sucesso no processo de alocação. O uso de tais funcionalidades se mostra mais eficiente do que outros métodos de alocação, conforme mostram os resultados apresentados nas tabelas 6.6 e 7.1.

Através dos dados de simulações apresentados na Tabela 7.1, que são complementares às simulações realizadas no Capítulo 6, é possível comparar os resultados do sistema proposto (Cenário 1) com outros cenários que não consideram o uso de predição e adaptabilidade da base de dados de canais. Os indicadores da Tabela 7.1 são os mesmos definidos no Capítulo 6 e consideram uma simulação de média escala.

Tabela 7.1 - Comparação dos indicadores dos cenários de validação.

| Cenário | Sucesso canal (%) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) | Detecções por SU (n) |
|---------|-------------------|---------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 96,77 | 100 | 97,02 | 2,98 | 1,03 |
| 2 | 82,39 | 100 | 87,18 | 12,82 | 1,21 |
| 3 | 69,31 | 98,8 | 77,58 | 22,42 | 1,43 |
| 4 | 45,86 | 99,82 | 51,25 | 48,75 | 2,18 |
| 5 | 93,45 | 100 | 96,11 | 3,89 | 1,07 |

Fonte: o autor.

O melhor desempenho do Cenário 1 em todos os indicadores mostra que o método proposto é mais eficiente que os demais. O indicador *Detecções por SU* do Cenário 1 merece destaque especial na Tabela 7.1, pois, ao atingir 1,03, ficou muito próximo do valor ideal que é 1. O melhor resultado do Cenário 5 (caráter adaptativo) em relação Cenário 2 (caráter preditivo), mostra que o modo adaptativo tem maior peso no resultado final do Cenário 1. No entanto, o fato de o Cenário 5 obter desempenho inferior ao Cenário 1 confirma que o melhor cenário é aquele que combina as duas funcionalidades (predição e adaptabilidade), ou seja, o Cenário 1.

Os resultados obtidos mostram que o gerenciamento da alocação de canais numa rede de rádios cognitivos (CRN) que utiliza uma base de dados preditiva adaptativa, reduz a troca de informações entre as funções que compõem a CRN. Isto ocorre porque o número de detecções de canal (*channel sensing*) é reduzido em 1,15 detecções por SU, se comparados por exemplo, o pior desempenho (Cenário 4) e o Cenário 1 na Tabela 7.1. Dessa forma, uma redução no número de operações de *channel sensing* implica em uma redução no tráfego de sinalização na rede, além de uma consequente diminuição em atrasos decorrentes da busca de canais disponíveis, resultando assim num melhor desempenho da CRN.

A IEEE 802.22 prevê a existência de uma base de dados (*Database Service, DS*) com informação de disponibilidade de canais para uso de CR, que é alimentada pela operadora ou órgão regulatório. A norma recomenda ainda, que a comunicação entre DS e *Base Station (BS)* ocorra pelo menos uma vez por dia para atualização da lista de canais. No entanto, o DS não é um elemento obrigatório na CRN. Existem situações onde o mesmo pode não existir, por uma determinação do órgão regulatório. Nesse caso, o *Spectrum Manager (SM)* deve ser capaz de identificar as

oportunidades no espectro disponível de forma independente. Assim, o Modo Adaptativo apresentado na Seção 5.4 vai de encontro ao proposto pela IEEE 802.22, especificamente no capítulo que define o *Database Service* (DS) e suas atribuições, pois permite que o SM/BS construa a base de dados de canais a partir do zero e de forma autônoma, com base somente nos resultados do processo de alocação.

No âmbito do escopo deste trabalho, pode-se afirmar que a BS adquire maior independência no gerenciamento dos canais disponíveis, uma vez que ela consegue administrar a designação e classificação dos mesmos de forma autônoma. Ainda assim, o DS localizado na BS permanece disponível para intervenções pontuais das operadoras, colocando ou inserindo canais na lista de acordo com necessidades específicas. Além disso, a extensão das definições da IEEE 802.22 para um cenário que envolve áreas urbanas e faixas de frequências de operadoras celular, permite repensar a forma como as mesmas são utilizadas pelas operadoras. Numa abordagem mais ampla, uma "permissão" de utilização do espectro licenciado por SUs pode representar não só numa utilização mais coerente do espectro, mas também numa ação lucrativa para os detentores dos direitos de exploração do mesmo.

A teoria de rádios cognitivos é um assunto extremamente vasto e com grandes oportunidades de desenvolvimento. Neste trabalho uma parte importante relacionada ao gerenciamento do espectro foi apresentada. No entanto, uma continuidade pode ser dada ao integrar o sistema aqui apresentado com a *Spectrum Sensing Function* (SSF), que representa outra parte de grande importância numa rede de rádios cognitivos. Conforme visto no Capítulo 3, o SM possui uma relação muito próxima com o SSA/SSF. No sistema implementado as funções e respostas do SSF foram simuladas através do Módulo de Detecção de Espectro (MDE). Entretanto, conforme visto na Seção 5.1.4, este módulo apenas simula as respostas da SSF, pois as técnicas de detecção de usuário não fazem parte do escopo deste trabalho. Assim, a implementação de um módulo capaz de realizar a detecção de usuários e interagir com o SM pode garantir continuidade e tornar este trabalho mais abrangente. Além disso, um maior período de predição também pode ser considerado para construção da base de dados de canais. Com isto, seria possível obter um perfil de tráfego acurado dos canais, prevendo alterações de tráfego como, por exemplo, transições de finais de semana para dias de semana.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Resolução 625/2013**. 2013. Disponível em:

<<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=13/11/2013&jornal=1&pagina=129&totalArquivos=158>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

ARSLAN, H. **Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptative Wireless Systems**. Holanda: Springer, 2007.

BROADBAND WIRELESS NETWORKING LAB. School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology. **Cognitive Radio Networks**. 2006. Disponível em: <<http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/CR/>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

COLLINS, M. J. **A Push in the Right Direction**. 1997. Disponível em: <http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_97/journal/vol2/mjc4/>. Acesso em: 22 ago. 2014.

FETTE, B. A. **Cognitive Radio Technology**. Burlington: Elsevier, 2006.

GEIRHOFER, S., TONG, L., SADLER, B. M. **A measurement-based model for dynamic spectrum access in WLAN channels**. Proceedings of the IEEE military communications conference. Washington, DC: MILCOM, 2006. p. 1–7.

GLISIC, S., LORENZO, B. **Advanced Wireless Networks**. 2nd. ed. Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd., 2009. p. 407-435.

HARDIN, G. **The Tragedy of the Commons**. 1968. Disponível em: <http://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Tragedy_of_the_commons.html>. Acesso em: 19 ago. 2014.

HAYKIN, S. **Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications**. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. v. 23. p. 201–220, 2005.

HOSSAIN, E., NIYATO, D., HAN, Z. **Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks**. Cambridge: Cambridge, 2009.

HÖYHTYÄ, M., POLLIN, S., MÄMMELÄ, A. **Classification-based predictive channel selection for cognitive radios**. 2010. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5501787>. Acesso em: 07 abr. 2014.

HÖYHTYÄ, M., VARTIAINEN, J., SARVANKO, H., MÄMMELÄ, A. **Combination of short term and long term database for cognitive radio resource management**. 2010. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5702799>. Acesso em: 27 abr. 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE 802.22**: IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and information exchange between systems. Wireless Regional Area Networks (WRAN) Specific requirements. Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands. Nova York: 2011. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.22-2011.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2014.

INTERNET ENGINEERING TASK FORCE (IETF). **The Secure Sockets Layer (SSL) Protocol Version 3.0**. 2011. ISSN 20170-1721. Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/rfc6101>>. Acesso em: 22 ago. 2014.

JONES, M. C. **Kumaraswamy's distribution**: a beta-type distribution with some tractability advantages. Milton Keynes: Statistical Methodology 6 (2009) 70–81, 2009.

KIM, S., WANG, H. **Cross-Layer Dynamic Channel Allocation Scheduling for OFDMA Systems**. 2013. Disponível em: <<http://www.aicit.org/AISS/ppl/AISS3747PPL.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2014.

LÓPEZ-BENÍTEZ, M., CASADEVALL, F. **Modeling and Simulation of Time-Correlation Properties of Spectrum Use in Cognitive Radio**. 2011a. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6030801>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

LÓPEZ-BENÍTEZ, M., CASADEVALL, F. **Spectrum Usage Models for the Analysis, Design and Simulation of Cognitive Radio Networks**. [S.l.]: Springer, 2011b. Disponível em:

<http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloadaddocument/9789400718265-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1330464-p174125279>. Acesso em: 2 ago. 2014.

LÓPEZ-BENÍTEZ, M., CASADEVALL, F., LÓPEZ-PÉREZ, D., VASILAKOS, A. V. **Modeling and Simulation of Joint Time-Frequency Properties of Spectrum Usage in Cognitive Radio**. 2011. Disponível em:

<http://www.lopezbenitez.es/int_conferences/CogART_2011.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2014.

MATSUMURA, Y., KUMAGAI, S., OBARA, T., YAMAMOTO, T., ADACHI, F. **Channel Segregation Based Dynamic Channel Assignment for WLAN**. 2012. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6406191>. Acesso em: 01 ago. 2014.

MCHENRY, M., MCCLOSKEY, D., LANE-ROBERTS, G. **Spectrum occupancy measurements, location 4 of 6**: Republican national convention. Revision 2. Nova York: 2004.

MCLEOD, D. **How 'white spaces' could change the world**. 2013. Disponível em: <<http://www.techcentral.co.za/how-white-spaces-could-change-the-world/40394/>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

MITOLA, J. **Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio**. Estocolmo: KTH, 2000. Doutorado em Tecnologia, Royal Inst. Technol. (KTH). Suécia: 2000.

ORANGE KENYA. **Fixed Broadband**. Disponível em: <http://orange.co.ke/complex/index.php?option=com_content&view=article&id=186&Itemid=266>. Acesso em: 22 ago. 2014.

PAPOULIS, A., PILLAI, S. U. **Probability, random variables, and stochastic processes**. 4th. ed. Boston: McGraw-Hill, 2002.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL. Biblioteca Central Ir. José Otão. **Modelo para apresentação de trabalhos acadêmicos, teses e dissertações elaborado pela Biblioteca Central Irmão José Otão**. 2011. Disponível em: <www.pucrs.br/biblioteca/trabalhosacademicos>. Acesso em: 20 ago. 2014.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL. Biblioteca Central Ir. José Otão. **Modelo de Referências Elaborado pela Biblioteca Central Irmão José Otão**. Disponível em:

<<http://www3.pucrs.br/portal/page/portal/biblioteca/Capa/BCEPesquisa/BCEPesquisaModelos>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

ŠTERN, A., VOLK, M., KANDUS, G., JAVORNIK, T., HROVAT, A., BEŠTER, J. **WAP over TETRA Trial Services**. 2008. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4610793>>. Acesso em: 04 ago. 2014.

TONG-HUI, W., LIANG, L., ZHUO-MING, L., JIN, S. **Resource Allocation with Shared Channel and Control Channel For LTE Downlink**. 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5360730>>. Acesso em: 01 ago. 2014.

VARTIAINEN, J., HÖYHTYÄ, M., LEHTOMÄKI, J., BRÄYSY, T. **Priority Channel Selection Based on Detection History Database**. 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5577690&queryText=%3DPriority+Channel+Selection>>. Acesso em: 02 abr. 2014.

VENKATARAMAN, H., MUNTEAN, G. **Cognitive Radio and its Application for Next Generation Cellular and Wireless Networks**. [S.l.]: Springer, 2012. p. 29-73.

WYGLINSKI, A. M., NEKOVEE, M., HOU, Y.T. **Cognitive Radio Communications and Networks Principles and Practice**. Burlington: Elsevier, 2010.

3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP). **Network sharing: Architecture and functional description (release 6)**. 3GPP TS23.251. V6.6.0. 2006.

3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP). **Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network. Physical layer on the radio path. General description (Release 12)**. 2013.

Apêndice A - Código do MGE

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% PUCRS - FENG
% Mestrado em Engenharia Elétrica - 2014/1
%
% ALOCAÇÃO DE CANAIS EM UMA REDE DE RÁDIOS COGNITIVOS GERENCIADA POR BASE
% DE DADOS PREDITIVA ADAPTATIVA
%
% Author: Sandro Machado Ribeiro
%
%
% SPECTRUM OCCUPATION DATA GENERATION
%
% Version    Date      Notes
% 3.1        05/08/14
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [Idle_busy_file, Idle_busy] = D_spectrum_data(Time_duration, Band)

cd /Users/sandromribeiro/SkyDrive/PUCRS/MATLAB/D/work;

Enable_plot = 'yes'; % yes/no

if strcmp(Band, 'GSM900UL') == 1
    Channels = 175;
    Alfa = 2.4044; Beta = 116.6408;
    p = 0.2011;
    Location = [1.2 1.2]; scale = [210.91 3.3]; shape = [0.1784 0.1884];
    File_header=(801:975);
elseif strcmp(Band, 'GSM900DL') == 1
    Channels = 175;
    Alfa = 1.8119; Beta = 0.0778;
    p = 0.1322;
    Location = [0 3.515]; scale = [12 2.624]; shape = [0 0.1884];
    File_header = (976:1150);
elseif strcmp(Band, 'DCS1800UL') == 1
    Channels = 375;
```

```

    Alfa = 0.1423; Beta = 6.0738;
    p = 0.3824;
    Location = [1.2 1.2]; Scale = [210.91 3.3]; Shape = [0.1784 0.1884];
    File_header = (1151:1525);
elseif strcmp(Band, 'DCS1800DL') == 1
    Channels = 375;
    Alfa = 0.4525; Beta = 0.6118;
    p = 0.6096;
    Location = [0 3.515]; Scale = [12 2.624]; Shape = [0 0.1884];
    File_header = (1526:1900);
elseif strcmp(Band, 'TETRAUL') == 1
    Channels = 400;
    Alfa = 1.4105; Beta = 44.0554;
    p = 0.0752;
    Location = [3.578 3.515]; Scale = [10.9356 2.624];
    Shape = [0.1784 0.1884];
    File_header = (1:400);
elseif strcmp(Band, 'TETRADL') == 1
    Channels = 400;
    Alfa = 0.1540; Beta = 0.2837;
    p = 0.2857;
    Location = [3.578 3.515]; Scale = [6.71 2.624];
    Shape = [0.1784 0.1884];
    File_header = (401:800);
end

```

```

Archetype = [1 2 3 4 5];

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%
% MAIN
%
```

```

Duty_cycle = random('Beta', Alfa, Beta, 1, Channels);

```

```

Dc_matrix = zeros(length(Archetype), length(Duty_cycle));
for Current_channel = 1:length(Duty_cycle)
    if Duty_cycle(Current_channel) <= 0.05
        Dc_matrix(1, Current_channel) = Duty_cycle(Current_channel);
        Dc_matrix(2, Current_channel) = 0;
        Dc_matrix(3, Current_channel) = 0;
        Dc_matrix(4, Current_channel) = 0;
        Dc_matrix(5, Current_channel) = 0;
    elseif Duty_cycle(Current_channel) > 0.05 && ...

```



```

        Duty_cycle(Current_channel) <= 0.4
    Dc_matrix(1, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(2, Current_channel) = Duty_cycle(Current_channel);
    Dc_matrix(3, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(4, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(5, Current_channel) = 0;
elseif Duty_cycle(Current_channel) > 0.4 && ...
    Duty_cycle(Current_channel) <= 0.6
    Dc_matrix(1, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(2, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(3, Current_channel) = Duty_cycle(Current_channel);
    Dc_matrix(4, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(5, Current_channel) = 0;
elseif Duty_cycle(Current_channel) > 0.6 && ...
    Duty_cycle(Current_channel) <= 0.95
    Dc_matrix(1, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(2, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(3, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(4, Current_channel) = Duty_cycle(Current_channel);
    Dc_matrix(5, Current_channel) = 0;
elseif Duty_cycle(Current_channel) > 0.95 && ...
    Duty_cycle(Current_channel) <= 1
    Dc_matrix(1, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(2, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(3, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(4, Current_channel) = 0;
    Dc_matrix(5, Current_channel) = Duty_cycle(Current_channel);
end
end
end

Archetype_values = zeros(1, length(Archetype));
for i = 1:5
    [~, Archetype_values(i)] = size(find(Dc_matrix(i, :)));
end

Geo_cdf = 1 - (1 - p).^(1:Channels); % equation on page 26(52)

Archetype_probability = [Archetype_values(1)/Channels ...
    Archetype_values(2)/Channels ...
    Archetype_values(3)/Channels ...
    Archetype_values(4)/Channels ...
    Archetype_values(5)/Channels];

Assigned_value = 0;

```

```

Dc_index = ones(5, 1);
Pick_index = 1;
Archetype_counter = Archetype_values;
Channel_counter = Channels;
Dc_channel_value = zeros(1, Channels);

while Channel_counter > 0
    Next_archetype = randi(5);

    Cdf_value = rand(1);
    [~, Channels_per_cluster] = min(abs(Geo_cdf - Cdf_value));

    if Archetype_counter(Next_archetype) ~= 0

        if Archetype_counter(Next_archetype) < Channels_per_cluster
            Channels_per_cluster = Archetype_counter(Next_archetype);
        end

        while Assigned_value < Channels_per_cluster
            while Dc_matrix(Next_archetype, Dc_index(Next_archetype)) == 0
                Dc_index(Next_archetype) = Dc_index(Next_archetype) + 1;
            end
            Dc_channel_value(Pick_index) = Dc_matrix(Next_archetype, ...
                Dc_index(Next_archetype));
            Pick_index = Pick_index + 1;
            Assigned_value = Assigned_value + 1;
            Dc_index(Next_archetype) = Dc_index(Next_archetype) + 1;
        end

        Archetype_counter(Next_archetype) = ...
            Archetype_counter(Next_archetype) - Assigned_value;
        Channel_counter = Channel_counter - Assigned_value;
        Assigned_value = 0;
    end
end

Mean_idle_time = Location(1) + (Scale(1)/(1 - Shape(1)));
Mean_busy_time = Location(2) + (Scale(2)/(1 - Shape(2)));
Avg_dc_value = Mean_busy_time/(Mean_idle_time + Mean_busy_time);

if strcmp(Enable_plot, 'yes') == 1
    figure('Name', char(Band));
    set(gcf, 'color', 'w');
    subplot(211), ...

```

```

        title(strcat('Ocupação da faixa ', Band), 'FontSize', 12);
        hold on; grid on;
        xlabel('Índice do canal', 'fontsize', 12);
        ylabel('Tempo (minutos)', 'fontsize', 12);
    end

    for Current_channel=1:Channels
        if Avg_dc_value - Dc_channel_value(Current_channel) > 0
            while Avg_dc_value > Dc_channel_value(Current_channel) && ...
                (Avg_dc_value - Dc_channel_value(Current_channel)) > 0.001
                if scale(2) <= 0
                    scale(2) = 0;
                    scale(1) = scale(1) + 0.1;
                    Location(1) = Location(1) + 0.1;
                else
                    scale(1) = scale(1) + 0.01;
                    scale(2) = scale(2) - 0.01;
                end
                Mean_idle_time = Location(1) + (Scale(1)/(1 - Shape(1)));
                Mean_busy_time = Location(2) + (Scale(2)/(1 - Shape(2)));
                Avg_dc_value = Mean_busy_time/(Mean_idle_time + Mean_busy_time);
            end
        else
            while Avg_dc_value < Dc_channel_value(Current_channel) && ...
                (Dc_channel_value(Current_channel) - Avg_dc_value) > 0.001
                % Avoid negative values for scale parameter
                if scale(1) <= 0
                    scale(1) = 0;
                    scale(2) = scale(2) + 0.1;
                    Location(2) = Location(2) + 0.1;
                else
                    scale(1) = scale(1) - 0.01;
                    scale(2) = scale(2) + 0.01;
                end

                Time_idle = Location(1) + (Scale(1)/(1 - Shape(1)));
                Time_busy = Location(2) + (Scale(2)/(1 - Shape(2)));
                Avg_dc_value = Time_busy/(Time_idle + Time_busy);
            end
        end
    end

    Gp_idle = gprnd(Shape(1), scale(1), Location(1), 1, Time_duration);
    Gp_busy = gprnd(Shape(2), scale(2), Location(2), 1, Time_duration);

```

```

Idle = zeros(size(Gp_idle)); Busy = zeros(size(Gp_busy));
for Round = 1:length(Gp_idle)
    Time_factor = 1/(Gp_idle(Round) + Gp_busy(Round));
    Idle(Round) = Time_factor*Gp_idle(Round);
    Busy(Round) = Time_factor*Gp_busy(Round);
end

Plot_factor = Time_duration/(sum(Gp_busy) + sum(Gp_idle));
Plot_idle = Plot_factor*Gp_idle;
Plot_busy = Plot_factor*Gp_busy;

if Current_channel == 1
    Idle_busy = zeros(length(Idle) + length(Busy), Channels);
end
Index = 1;
for n = 1:2:length(Idle) + length(Busy)
    Idle_busy(n, Current_channel) = Idle(Index);
    Idle_busy(n + 1, Current_channel) = Busy(Index);
    Index = Index + 1;
end

if strcmp(Enable_plot, 'yes') == 1
    Pointer = 0;
    for m = 1:length(Idle)
        Pointer = Pointer + Plot_idle(m);
        plot(Current_channel, Pointer:0.1:Pointer + Plot_busy(m), 'b');
        Pointer = Pointer + Plot_busy(m);
    end
end

Location = [3.578 3.515];
Scale = [10.9356 2.624];
Shape = [0.1784 0.1884];
Mean_idle_time = Location(1) + (Scale(1)/(1 - Shape(1)));
Mean_busy_time = Location(2) + (Scale(2)/(1 - Shape(2)));
Avg_dc_value = Mean_busy_time/(Mean_idle_time + Mean_busy_time);
end

if strcmp(Enable_plot, 'yes') == 1
    subplot(212), ...
        title(strcat('DC médio=', num2str(mean(Duty_cycle))), ...
            'FontSize', 12);
    hold on; grid on;
    plot(Dc_channel_value, 'r');

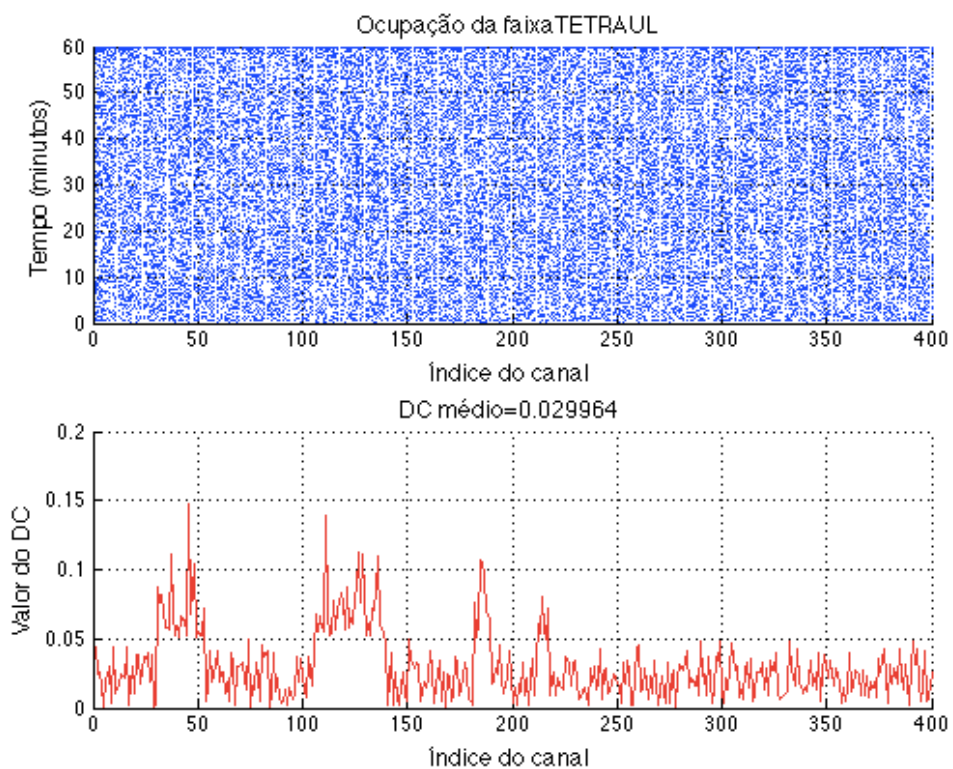
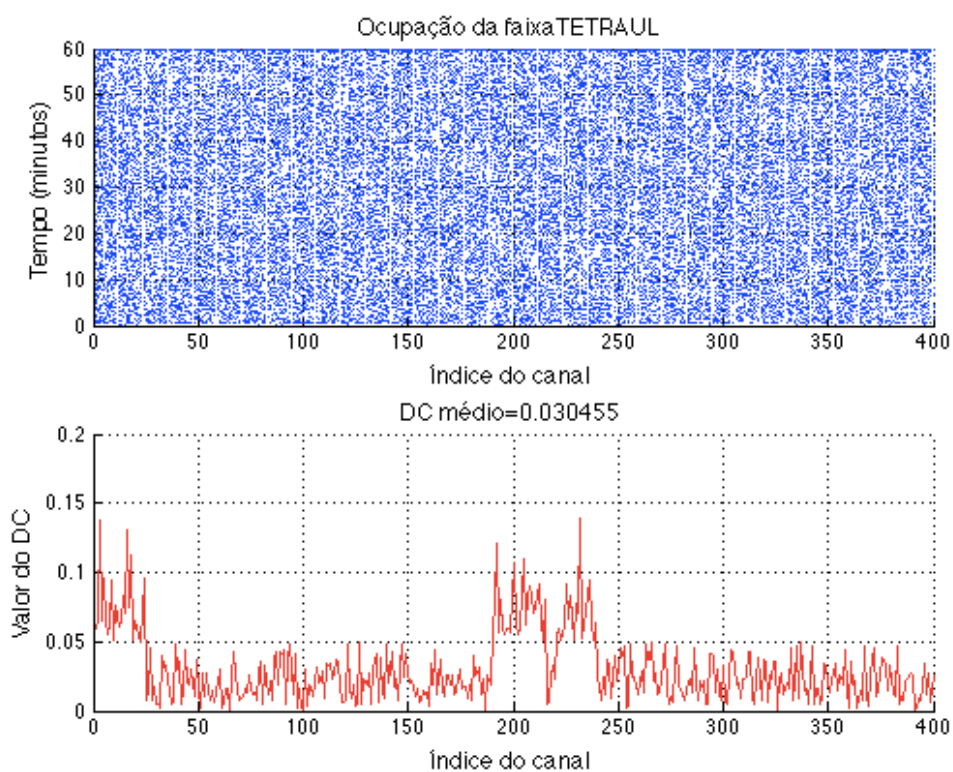
```

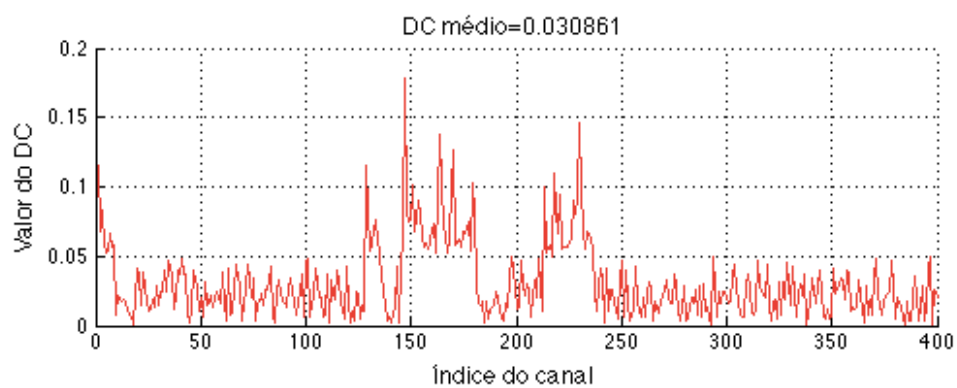
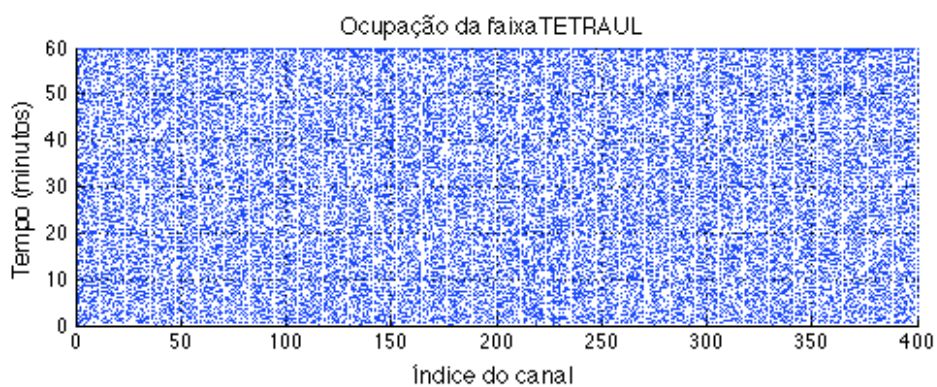
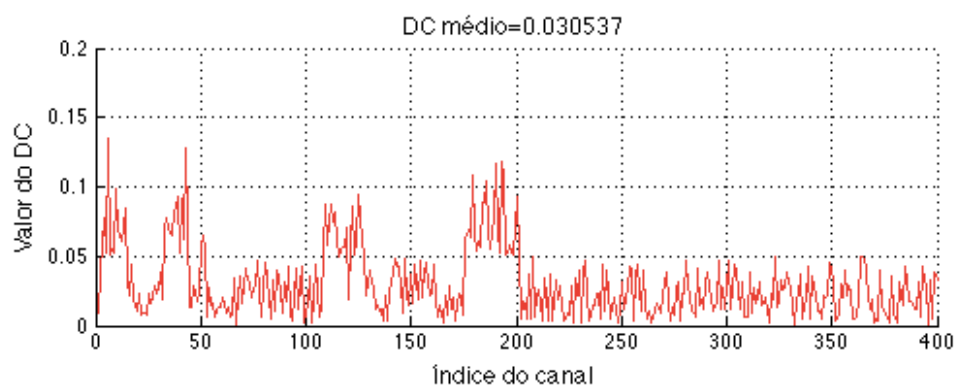
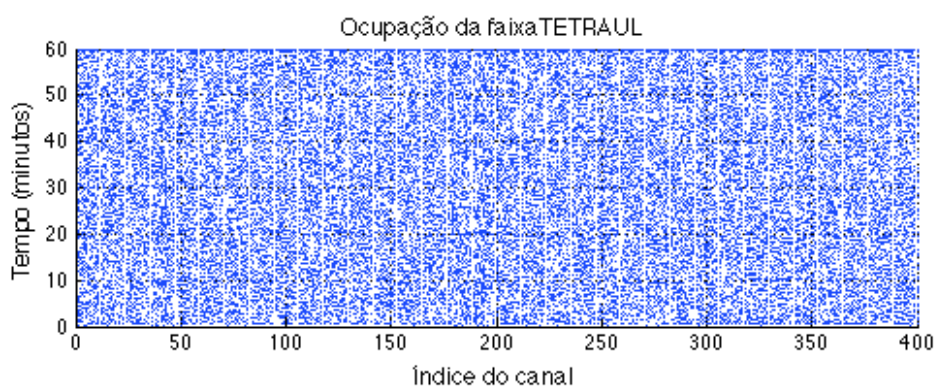

Apêndice B - Amostras de Espectro

As amostras neste apêndice têm como objetivo mostrar a ocupação nas faixas TETRA UL, TETRA DL, GSM 900 UL, GSM 900 DL, DCS 1800 UL e DCS 1800 DL, por inspeção visual, em diferentes horários. Para geração dos dados foi utilizado o procedimento detalhado na Seção 4.4, através do código do MGE. Dessa forma, cada amostra (par de gráficos) representa um horário diferente. As amostras são apresentadas na Figura B.1, separadas por banda. Seu principal objetivo é demonstrar que apesar de distribuições diferentes, o DC médio se mantém, preservando assim, as propriedades estatísticas do sinal.

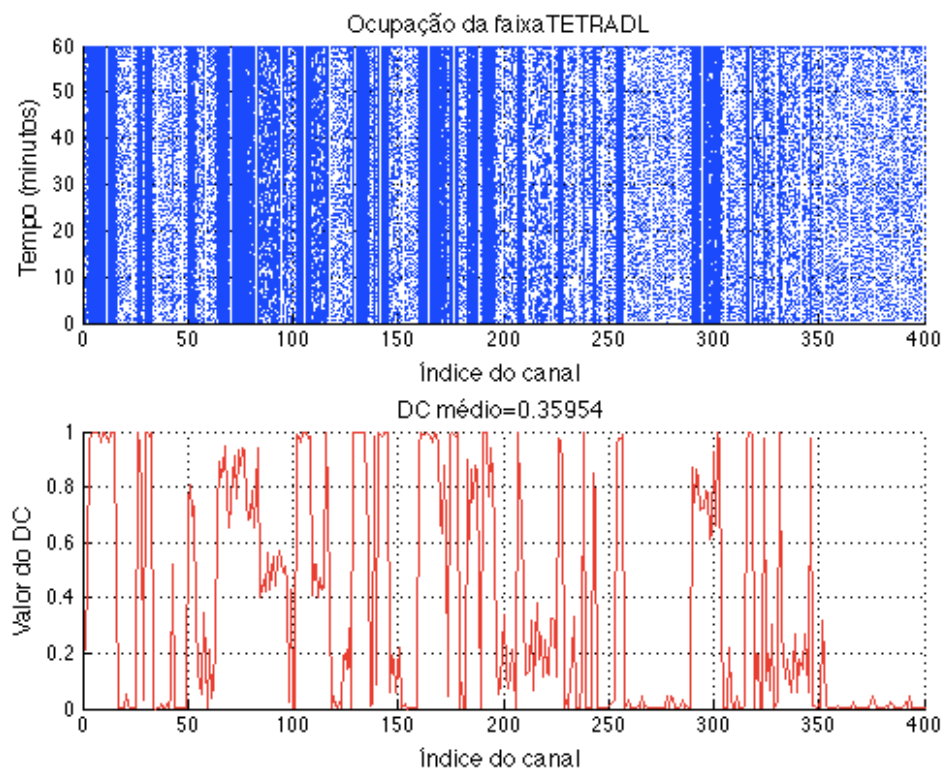
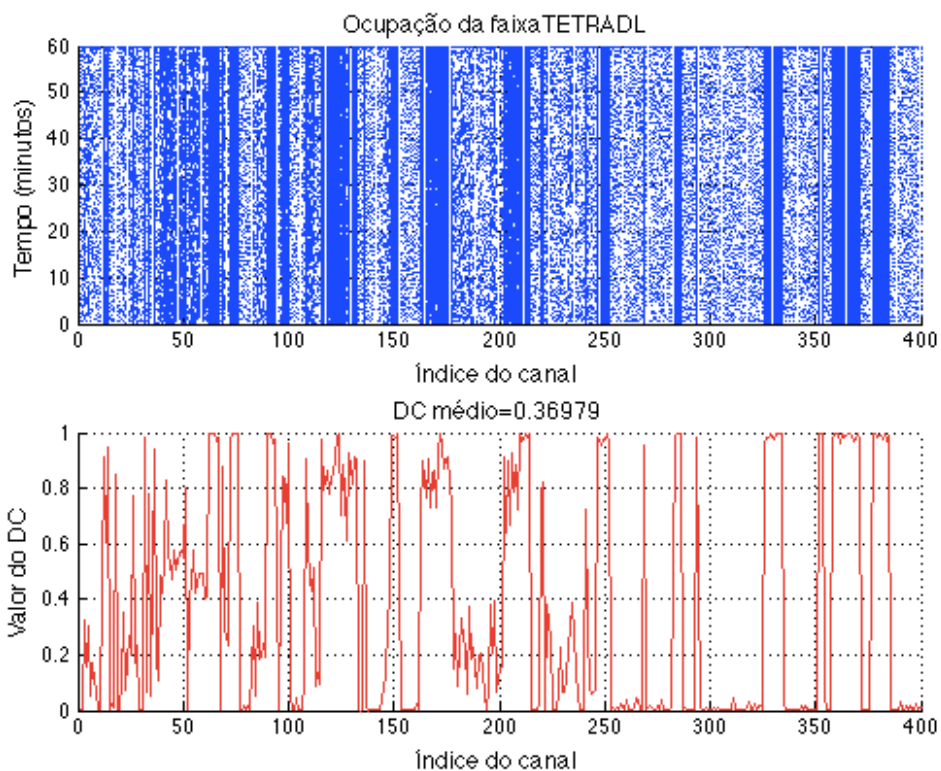
Figura B.1 - Amostras de dados simulados de ocupação de espectro.

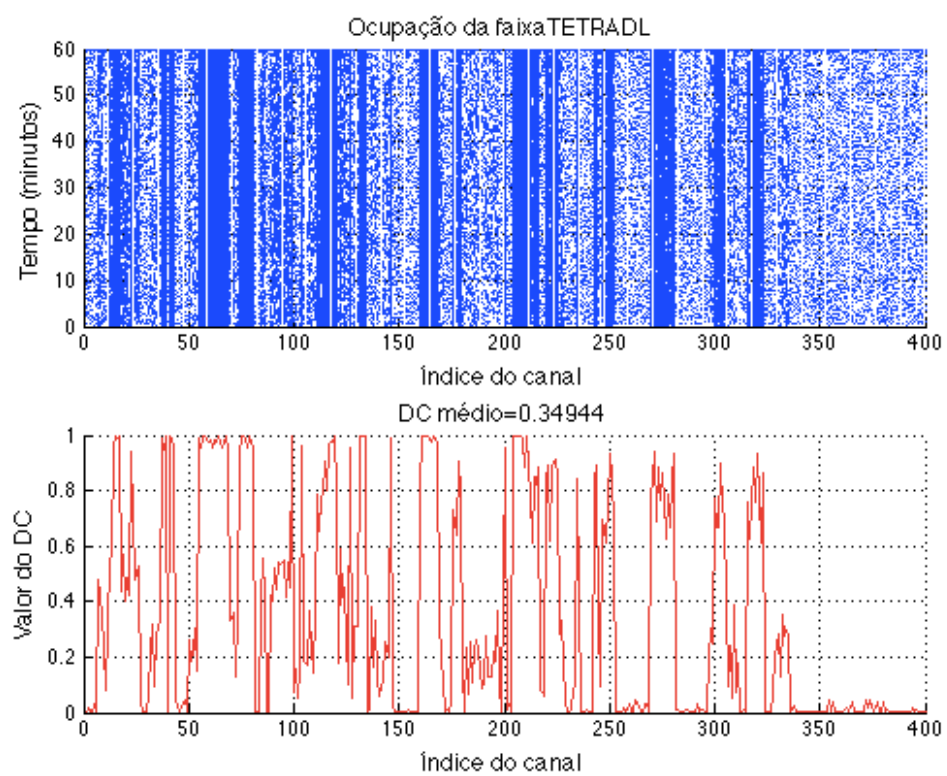
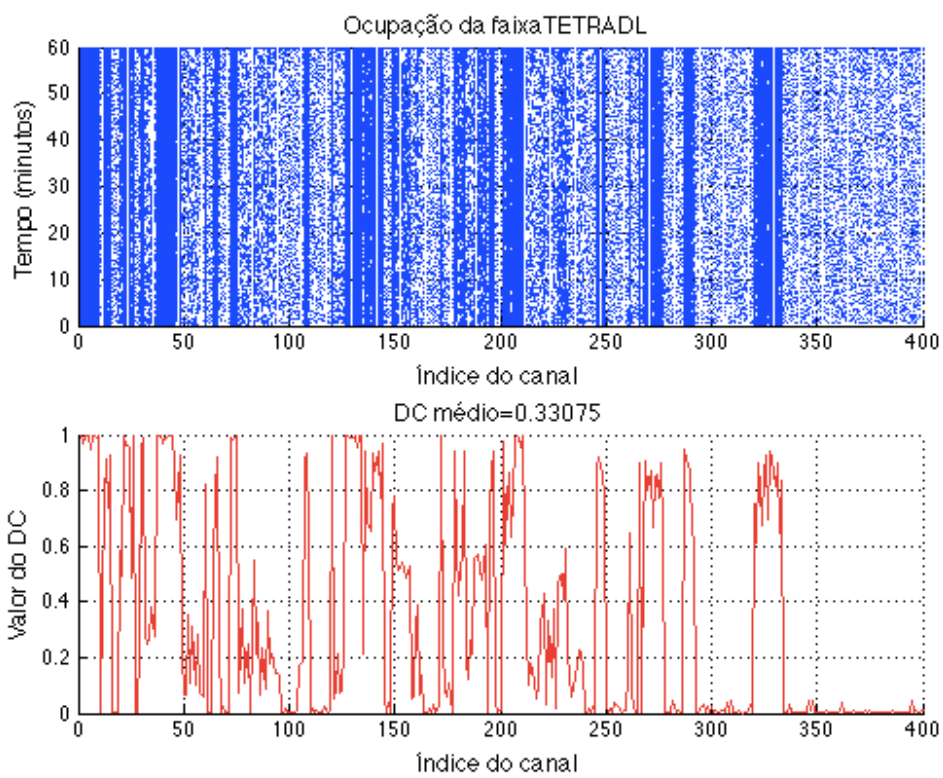
(a) TETRA UL.



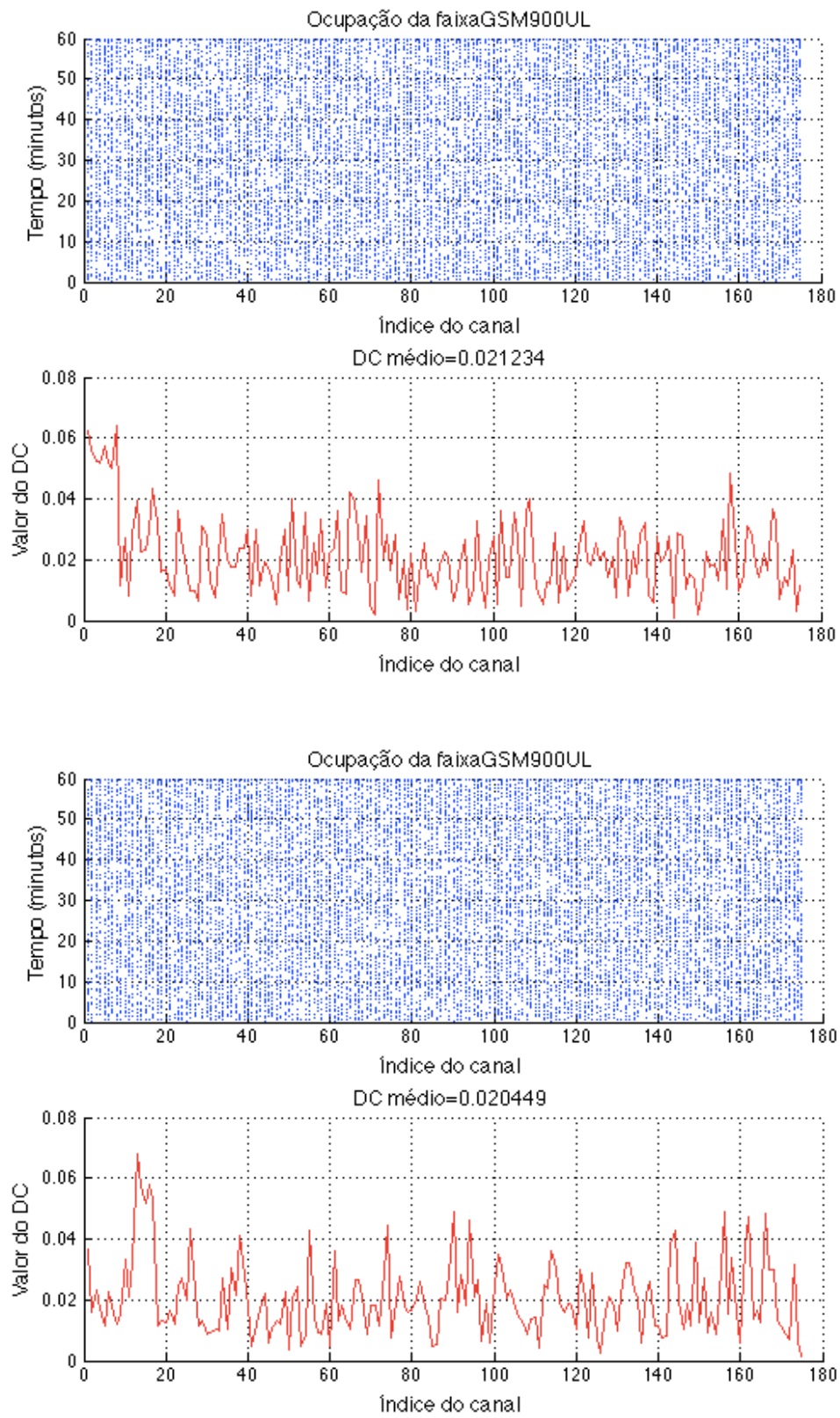


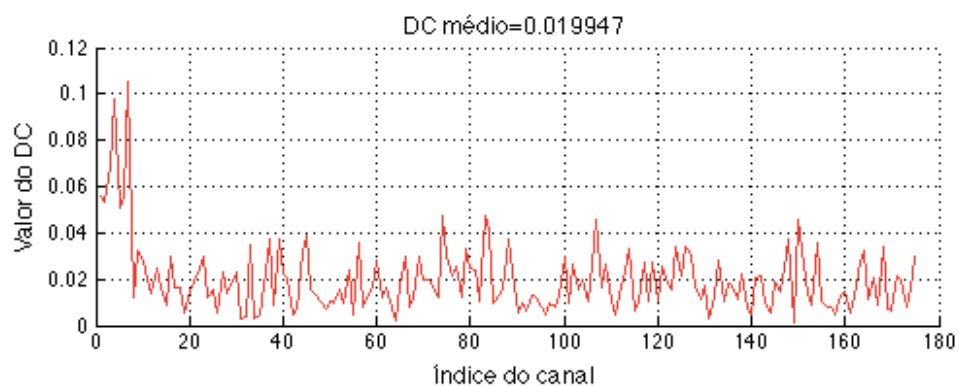
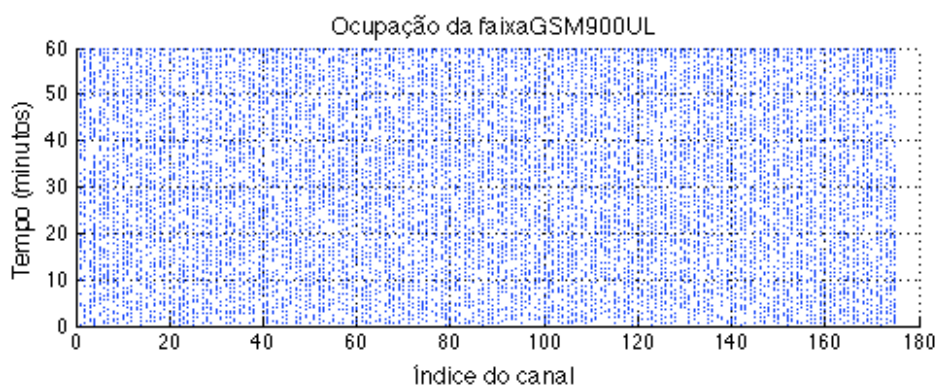
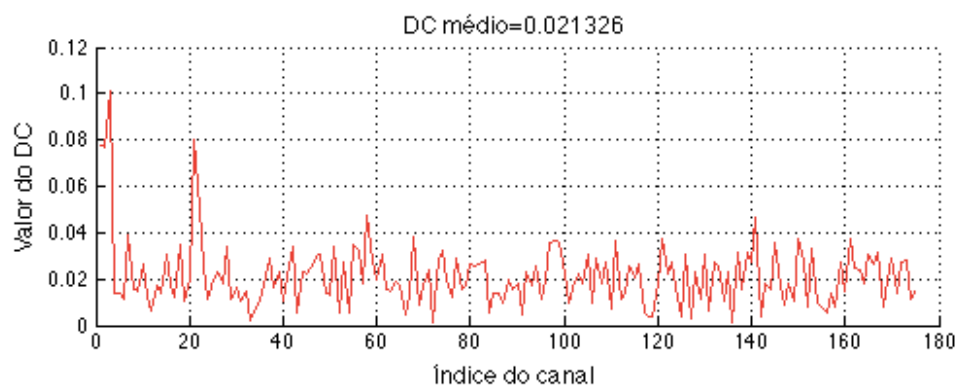
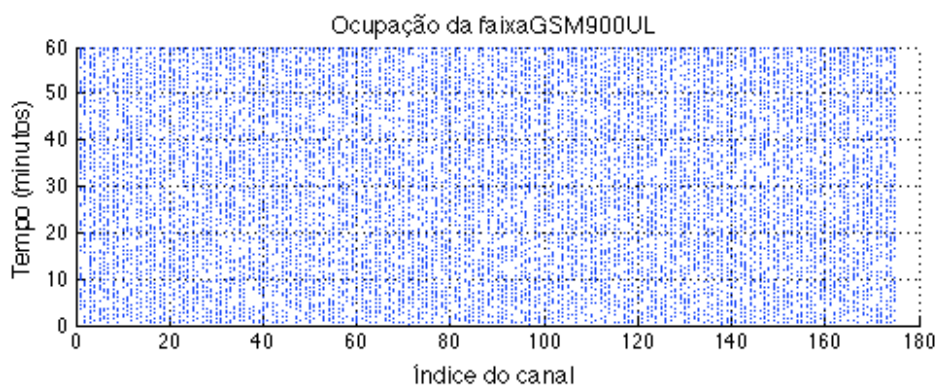
(b) TETRA DL.



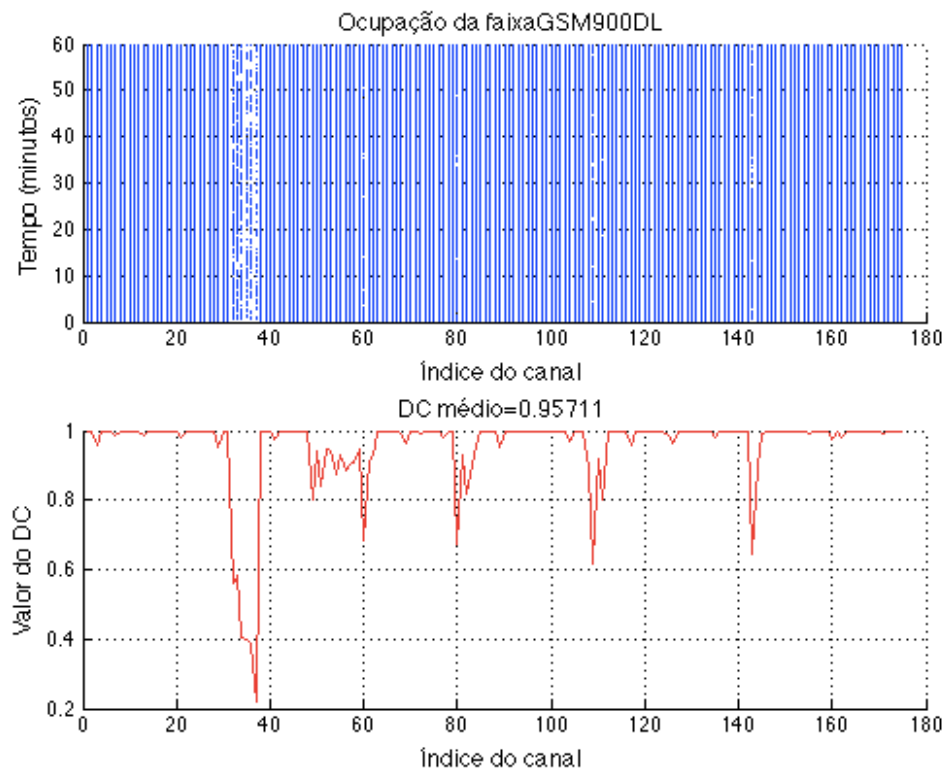
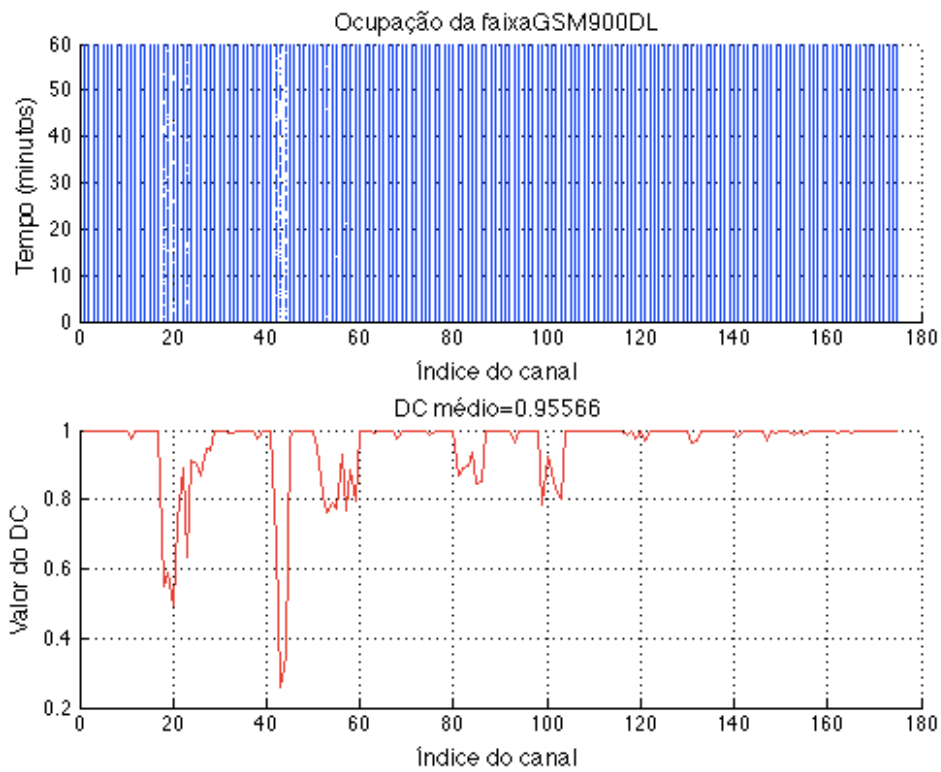


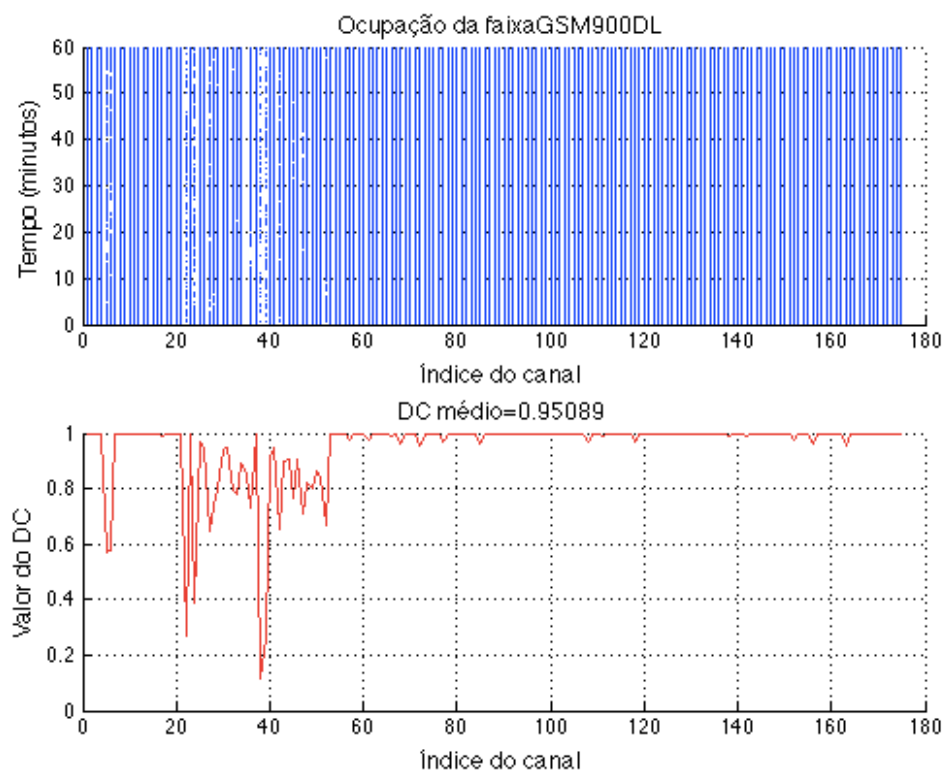
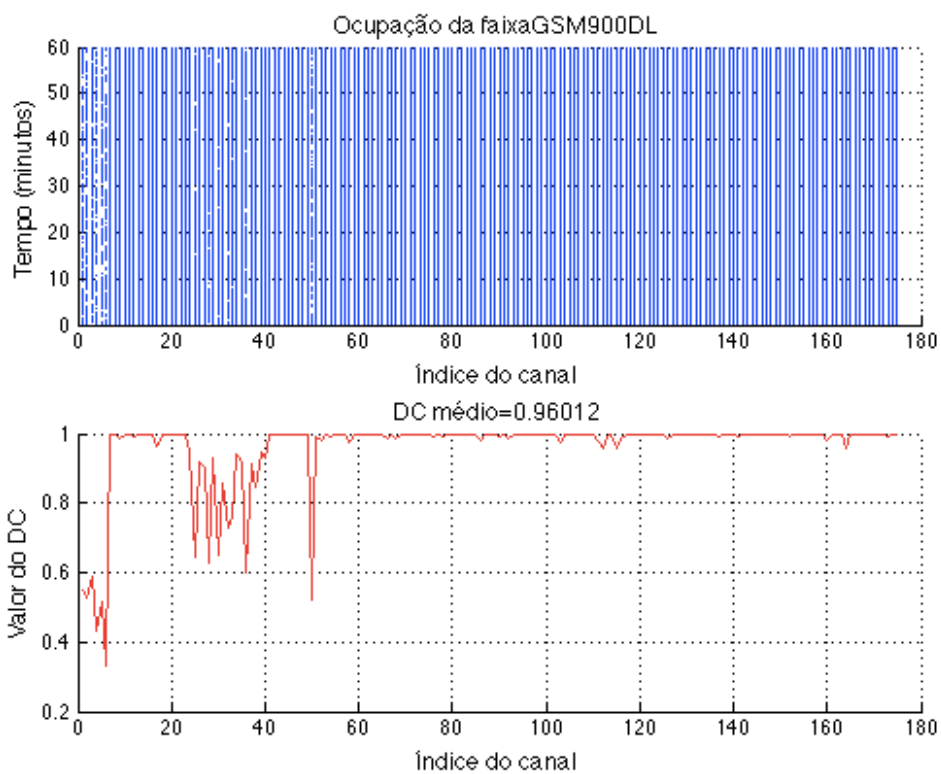
(c) GSM 900 UL.



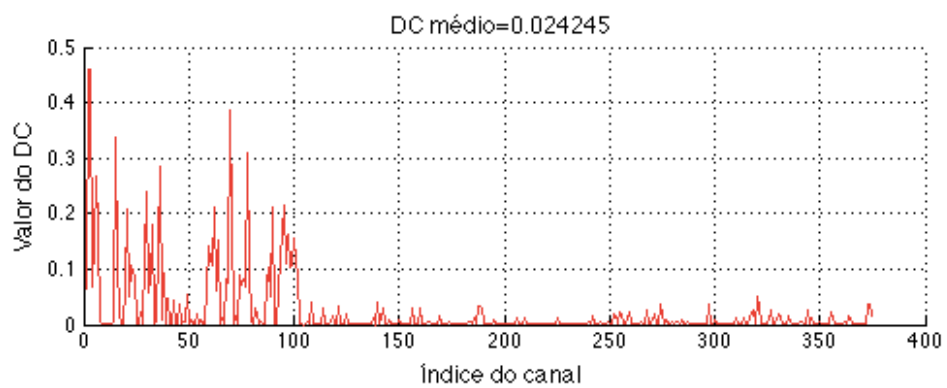
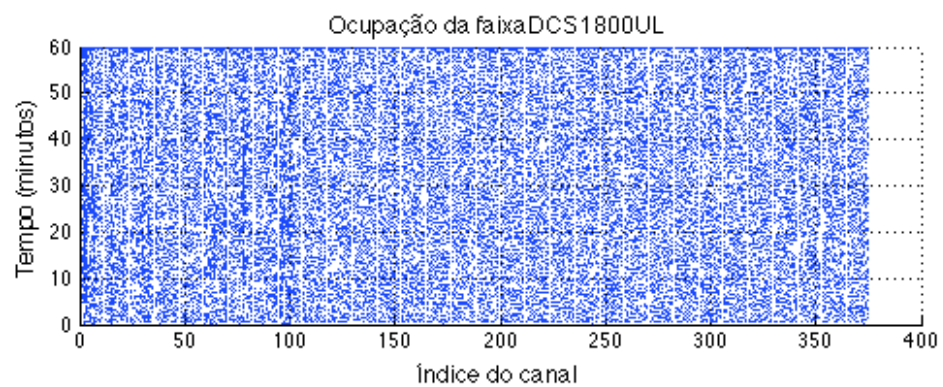
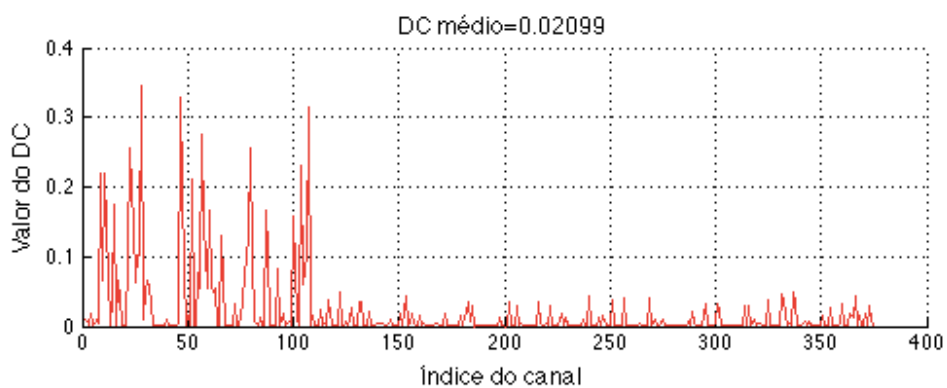
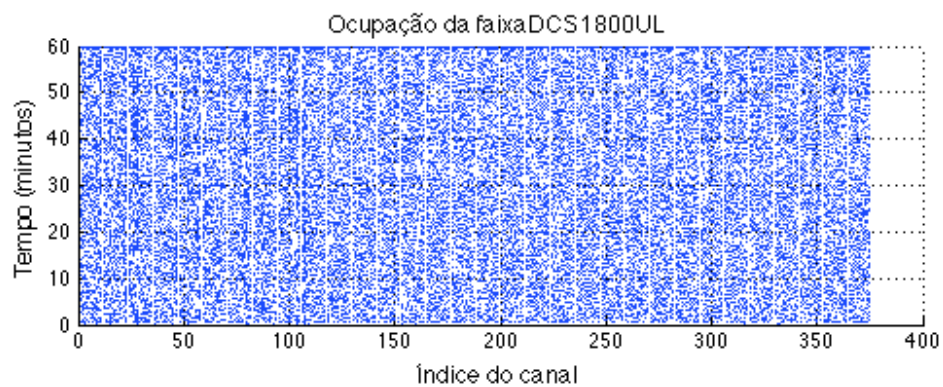


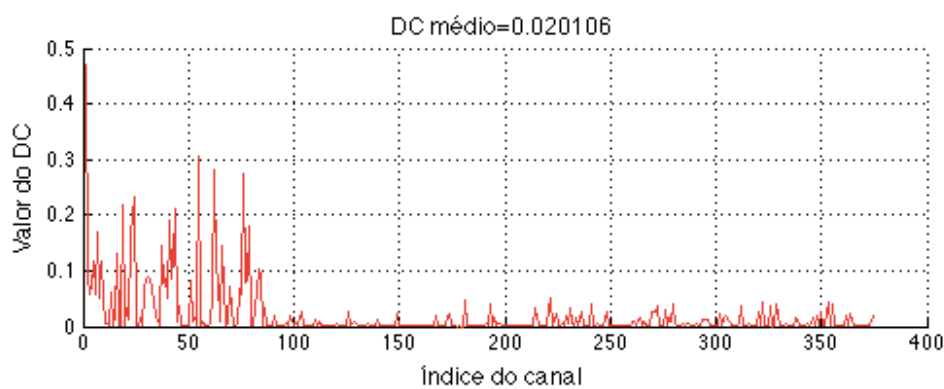
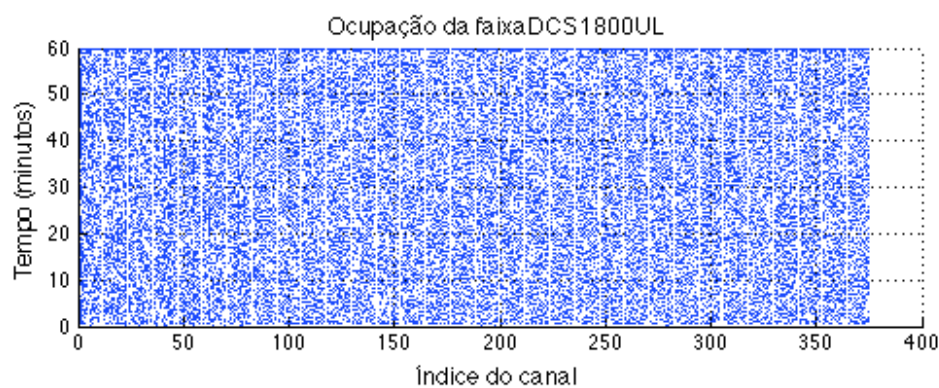
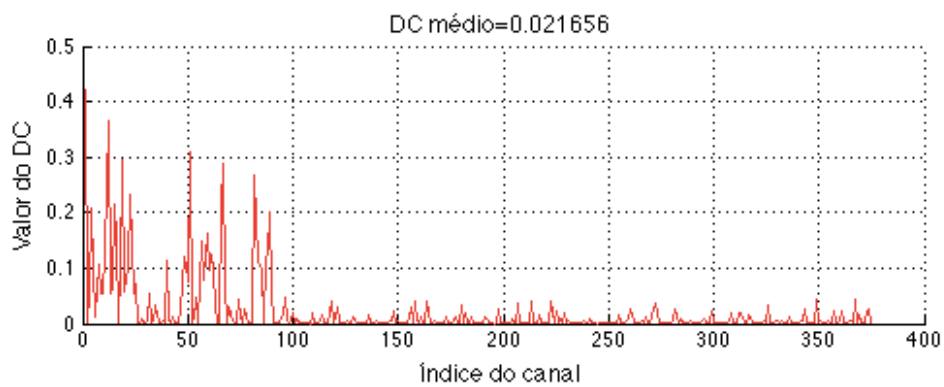
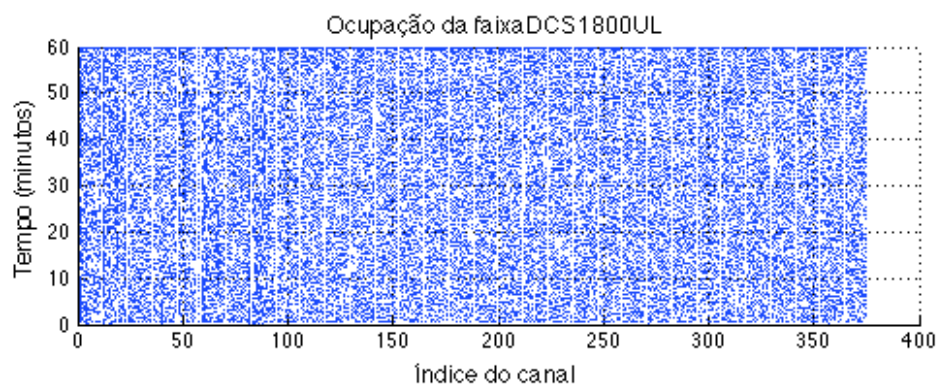
(d) GSM 900 DL.



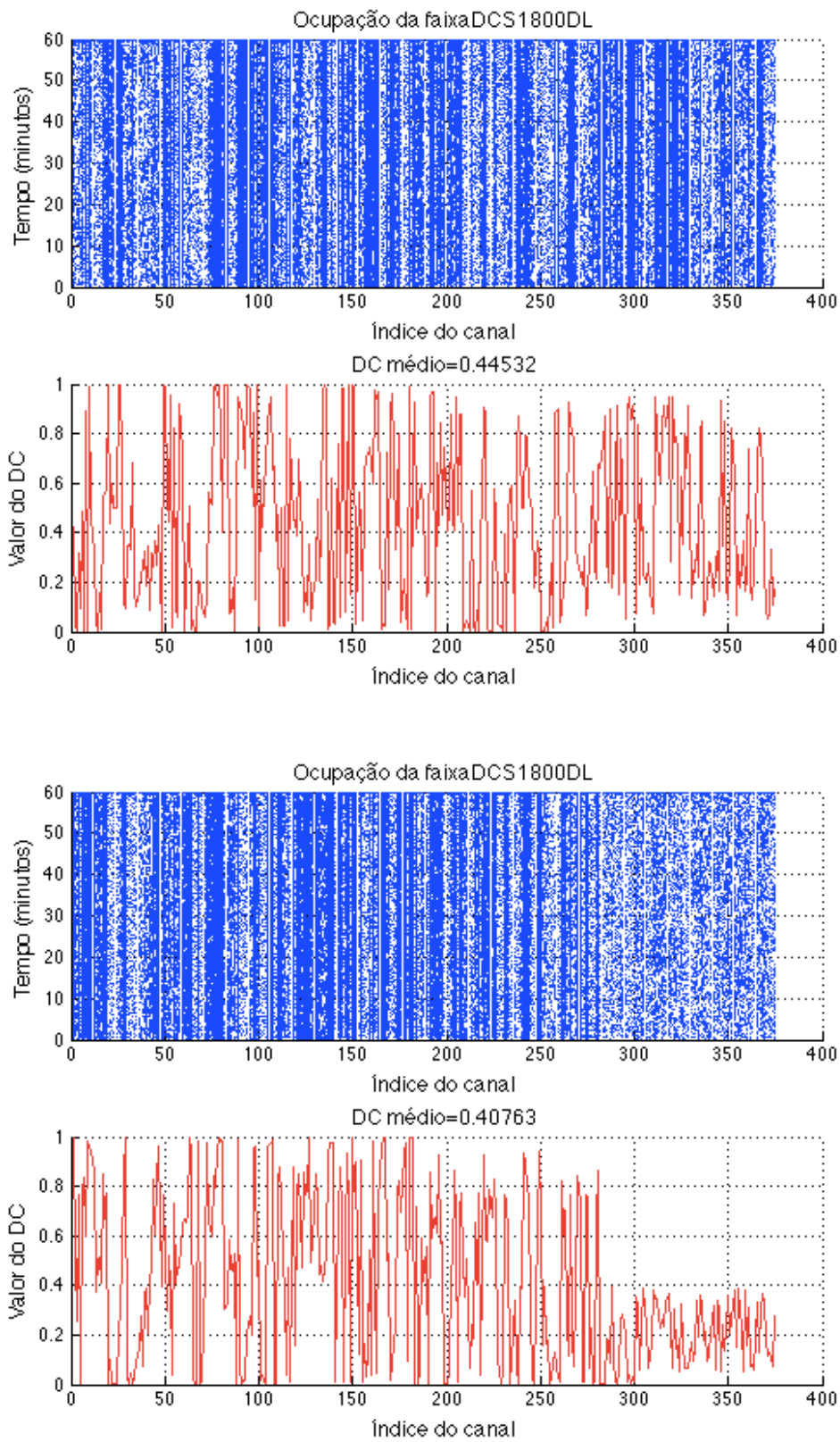


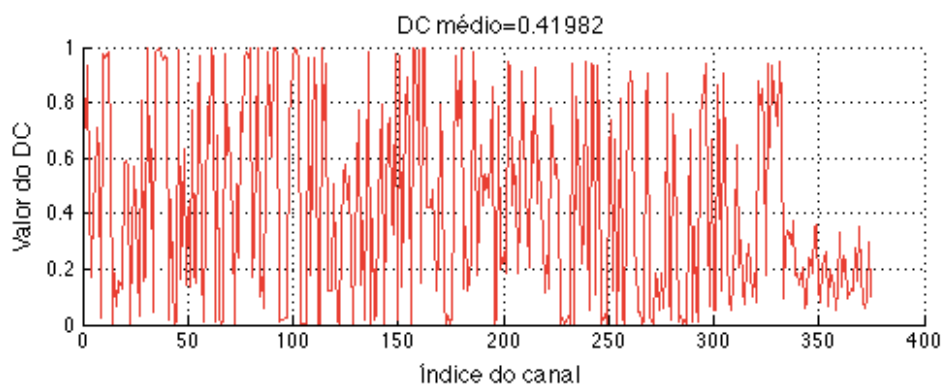
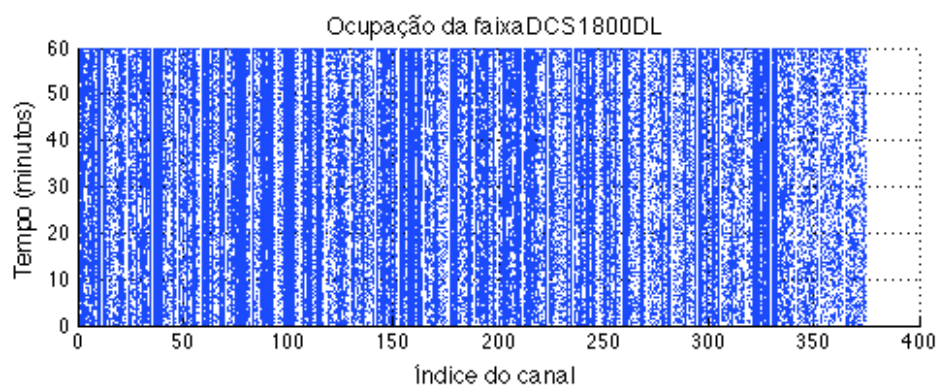
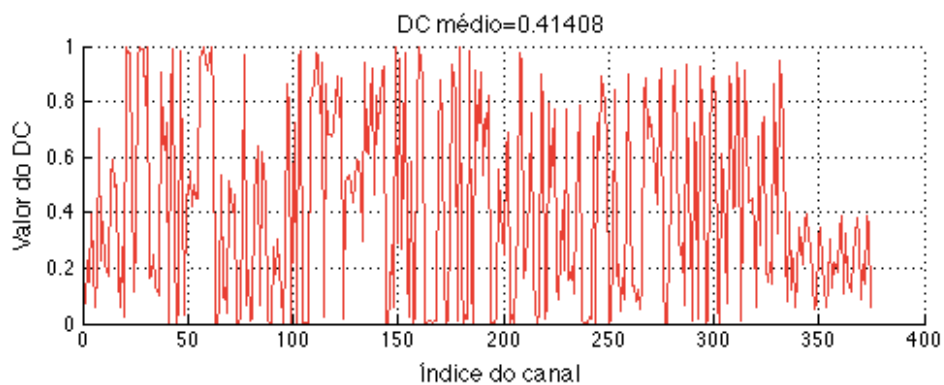
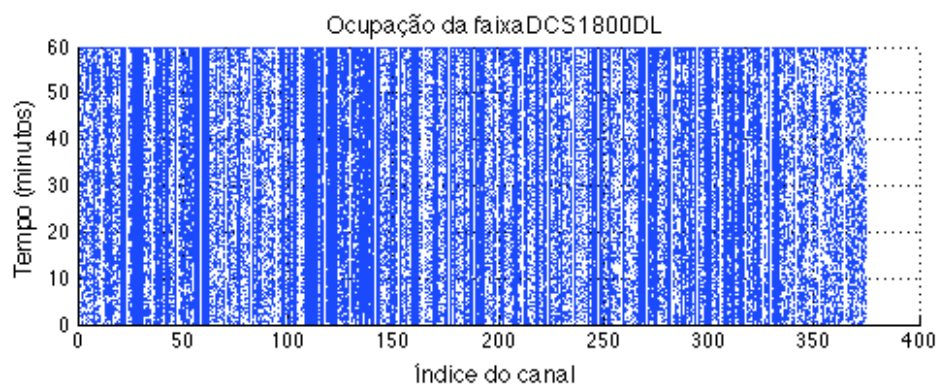
(e) DCS 1800 UL.





(f) DCS 1800 DL.





Apêndice C - Código do MCC

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% PUCRS - FENG
% Mestrado em Engenharia Elétrica - 2014/1
%
% ALOCAÇÃO DE CANAIS EM UMA REDE DE RÁDIOS COGNITIVOS GERENCIADA POR BASE
% DE DADOS PREDITIVA ADAPTATIVA
%
% Author: Sandro Machado Ribeiro
%
%
% SPECTRUM DATA CLASSIFICATION
%
% Version    Date        Notes
% 6.0        22/07/14
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [Spectrum, Channel_list_matrix] = D_channel_sort(...
    Channel_sort, ...
    Channels, ...
    Best_channels,...
    sort_mode)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% VARIABLES
%

cd /Users/sandromribeiro/SkyDrive/PUCRS/MATLAB/D/Work;

Enable_idle_plot = 'no';
Start_time = 0;

Files = dir('*.txt');

Time_duration = 60;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%
```

```
% MAIN
```

```
%
```

```
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Loading spectrum data...']);
Tetraul = 0; Tetradl = 0; Gsmul = 0; Gsmdl = 0; Dcsul = 0; Dcsdl = 0;
for a = 1:length(Files)
    File_name = Files(a).name;
    if strfind(File_name, 'TETRAUL') ~= ''
        Channel_range = 1:400;
        Tetraul = Tetraul + 1;
        if Tetraul > 1
            Spectrum_temp = importdata(File_name);
            [Inc, ~] = size(Spectrum_temp);
            Spectrum(Rows_tu + 1:Rows_tu + Inc, Channel_range) = ...
                Spectrum_temp;
            Rows_tu = Rows_tu + Inc;
        else
            Spectrum_temp = importdata(File_name);
            [Rows_tu, ~] = size(Spectrum_temp);
            Spectrum(1:Rows_tu, Channel_range) = Spectrum_temp;
        end

    elseif strfind(File_name, 'TETRADL') ~= ''
        Channel_range = 401:800;
        Tetradl = Tetradl + 1;
        if Tetradl > 1
            Spectrum_temp = importdata(File_name);
            [Inc, ~] = size(Spectrum_temp);
            Spectrum(Rows_td + 1:Rows_td + Inc, Channel_range) = ...
                Spectrum_temp;
            Rows_td = Rows_td + Inc;
        else
            Spectrum_temp = importdata(File_name);
            [Rows_td, ~] = size(Spectrum_temp);
            Spectrum(1:Rows_td, Channel_range) = Spectrum_temp;
        end

    elseif strfind(File_name, 'GSM900UL') ~= ''
        Channel_range = 801:975;
        Gsmul = Gsmul + 1;
        if Gsmul > 1
            Spectrum_temp = importdata(File_name);
```

```

        [Inc,~] = size(Spectrum_temp);
        Spectrum(Rows_gu + 1:Rows_gu + Inc, Channel_range) = ...
            Spectrum_temp;
        Rows_gu = Rows_gu + Inc;
    else
        Spectrum_temp = importdata(File_name);
        [Rows_gu, ~] = size(Spectrum_temp);
        Spectrum(1:Rows_gu, Channel_range) = Spectrum_temp;
    end

elseif strfind(File_name, 'GSM900DL') ~= ' '
    Channel_range = 976:1150;
    Gsmdl = Gsmdl + 1;
    if Gsmdl > 1
        Spectrum_temp = importdata(File_name);
        [Inc, ~] = size(Spectrum_temp);
        Spectrum(Rows_gd + 1:Rows_gd + Inc, Channel_range) = ...
            Spectrum_temp;
        Rows_gd = Rows_gd + Inc;
    else
        Spectrum_temp = importdata(File_name);
        [Rows_gd, ~] = size(Spectrum_temp);
        Spectrum(1:Rows_gd, Channel_range) = Spectrum_temp;
    end

elseif strfind(File_name, 'DCS1800UL') ~= ' '
    Channel_range = 1151:1525;
    Dcsul = Dcsul + 1;
    if Dcsul > 1
        Spectrum_temp = importdata(File_name);
        [Inc, ~] = size(Spectrum_temp);
        Spectrum(Rows_du + 1:Rows_du + Inc, Channel_range) = ...
            Spectrum_temp;
        Rows_du = Rows_du + Inc;
    else
        Spectrum_temp = importdata(File_name);
        [Rows_du, ~] = size(Spectrum_temp);
        Spectrum(1:Rows_du, Channel_range) = Spectrum_temp;
    end

elseif strfind(File_name, 'DCS1800DL') ~= ' '
    [~, Columns] = size(importdata(File_name));
    while Columns ~= 375
        save(strcat(File_name, '.error'), 'File_name', '-ASCII');
    end
end

```

```

        delete(File_name);
        [File_name, ~] = D_spectrum_data(60, 'DCS1800DL');
        [~, Columns] = size(importdata(File_name));
    end

    Channel_range = 1526:1900;
    Dcsdl = Dcsdl+1;
    if Dcsdl > 1
        Spectrum_temp = importdata(File_name);
        [Inc, ~] = size(Spectrum_temp);
        Spectrum(Rows_dd + 1:Rows_dd + Inc, Channel_range) = ...
            Spectrum_temp;
        Rows_dd = Rows_dd + Inc;
    else
        Spectrum_temp = importdata(File_name);
        [Rows_dd, ~] = size(Spectrum_temp);
        Spectrum(1:Rows_dd, Channel_range) = Spectrum_temp;
    end
end

delete(File_name);
end

if strcmp(Channel_sort, 'sorton') == 1
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] Sorting channels...']);
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] Sort mode is ', num2str(Sort_mode)]);

    if strcmp(Sort_mode, 'topidle') == 1
        sum_idle_channel = zeros(1, Channels);
        if exist('Skip_congested.mat', 'file') == 2
            for b = 1:400
                sum_idle_channel(b) = sum(Spectrum(1:2:end, b));
            end
            for b = 801:975
                sum_idle_channel(b) = sum(Spectrum(1:2:end, b));
            end
            for b = 1151:1525
                sum_idle_channel(b) = sum(Spectrum(1:2:end, b));
            end
        else
            for b = 1:Channels
                sum_idle_channel(b) = sum(Spectrum(1:2:end, b));
            end
        end
    end
end

```

```

Top_idle = zeros(1, Best_channels);
for c = 1:Best_channels
    [~, Channel] = max(Sum_idle_channel);
    Top_idle(1, c) = Channel;
    Sum_idle_channel(1, Channel) = 0;
end
Channel_list_matrix = Top_idle;

elseif strcmp(Sort_mode, 'tophour') == 1
    Sum_idle_hour = zeros(24, Channels);
    for Channel = 1:Channels
        Minute = 0; Hour = 1;
        % Sum idle cycles for each hour
        while Minute < length(Spectrum)
            Sum_idle_hour(Hour, Channel) = sum(Spectrum(Minute + ...
                1:2:Minute + 120, Channel));
            Minute = Minute + 120;
            Hour = Hour + 1;
        end
    end
    save('Sum_idle_hour', 'Sum_idle_hour');
    Top_idle_hour = zeros(24, Best_channels);
    for Index = 1:Best_channels
        for Hour = 1:24
            [~, Top_idle_hour(Hour, Index)] = ...
                max(Sum_idle_hour(Hour, :));
            Sum_idle_hour(Hour, Top_idle_hour(Hour, Index)) = 0;
        end
    end
    Channel_list_matrix = Top_idle_hour;

elseif strcmp(Sort_mode, 'kmeans') == 1
    Sum_idle_channel = zeros(Channels, 2);
    for Channel = 1:Channels
        Sum_idle_channel(Channel, 1) = Channel;
        Sum_idle_channel(Channel, 2) = sum(Spectrum(1:2:end, Channel));
    end

    [Clusters, Centroid] = kmeans(Sum_idle_channel, 6);

    figure('Name', 'Channel clusters');
    plot(Sum_idle_channel(Clusters == 1, 1), ...
        Sum_idle_channel(Clusters == 1, 2), '.'); hold on;
    plot(Sum_idle_channel(Clusters == 2, 1), ...

```

```

        Sum_idle_channel(Clusters == 2, 2), 'r');
plot(Sum_idle_channel(Clusters == 3, 1), ...
     Sum_idle_channel(Clusters == 3, 2), 'g');
plot(Sum_idle_channel(Clusters == 4, 1), ...
     Sum_idle_channel(Clusters == 4, 2), 'c');
plot(Sum_idle_channel(Clusters == 5, 1), ...
     Sum_idle_channel(Clusters == 5, 2), 'm');
plot(Sum_idle_channel(Clusters == 6, 1), ...
     Sum_idle_channel(Clusters == 6, 2), 'y');
legend('Cluster 1', 'Cluster 2', 'Cluster 3', 'Cluster 4', ...
      'Cluster 5', 'Cluster 6', 'Location', 'Best');
plot(Centroid(:, 1), Centroid(:, 2), 'kx', 'MarkerSize', 12, ...
     'Linewidth', 2);

Cluster_order = zeros(1, length(Centroid));
for Round = 1: length(Centroid)
    [~, Position] = max(Centroid(:, 2));
    Cluster_order(Round) = Position;
    Centroid(Position, 1) = 0;
    Centroid(Position, 2) = 0;
end

Cluster_size = zeros(length(Cluster_order), 2);
for Round = 1:length(Cluster_order)
    Cluster_size(Round, 1) = Cluster_order(Round);
    [Cluster_size(Round, 2), ~] = ...
        size(Sum_idle_channel(Clusters == Cluster_order(Round)));
end

Cluster_channels = zeros(length(Cluster_order), ...
    max(Cluster_size(:, 2)));
for Round = 1:length(Cluster_order)
    Cluster_channels(Cluster_size(Round, 1), ...
        1:Cluster_size(Round, 2)) = ...
        (Sum_idle_channel(Clusters == Cluster_size(Round, 1)))';
end

Cluster_table = zeros(sum(Cluster_size(:, 2)), 3);
Row = 1;
for Cluster = 1:length(Cluster_order)
    for column = 1:Cluster_size(1, 2)
        if Cluster_channels(Cluster_order(Cluster), column) == 0
            break
        else

```



```

        Cluster_table(Row, 1) = Cluster_order(Cluster);
        Cluster_table(Row, 2) = ...
            Cluster_channels(Cluster_order(Cluster), Column);
        Cluster_table(Row, 3) = ...
            Sum_idle_channel(Cluster_channels( ...
                Cluster_order(Cluster), Column), 2);
        Row = Row + 1;
    end
end
end

Channel_list_matrix = zeros(1, Best_channels);
for Column = 1:Best_channels
    [~, Channel] = max(Cluster_table(:, 3));
    Channel_list_matrix(Column) = Cluster_table(Channel, 2);
    Cluster_table(Channel, 3) = 0;
end
end

if strcmp(Enable_idle_plot, 'yes') == 1
    figure('Name', 'Idle spectrum');
    for d = 1:24
        for e = 1:length(Channel_list_matrix)
            Pointer = Start_time;
            plot(Channel_list_matrix(d, e), ...
                Start_time:0.1:Start_time + Time_duration, '-c');
            hold all;
            Idle_period = Spectrum(Start_time + 1:2:Start_time + ...
                2*Time_duration, Channel_list_matrix(d, e));
            Busy_period = Spectrum(Start_time + 2:2:Start_time + ...
                2*Time_duration, Channel_list_matrix(d, e));
            for f = 1:length(Idle_period)
                Pointer = Pointer + Idle_period(f);
                plot(Channel_list_matrix(d, e), ...
                    Pointer:0.1:Pointer + Busy_period(f), 'b');
                hold on;
                Pointer = Pointer + Busy_period(f);
            end
        end
    end
end
else
    Channel_list_matrix = 0;
end
end

```



```

% MAIN
%

disp(['[', num2str(Timestamp), '] Number of secondary users: ', ...
      num2str(Users)]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Number of QoS users: ', ...
      num2str(length(Qos_users))]);

Channel_db = zeros(length(Channel_list), 5);
for r = 1: length(Channel_list)
    Channel_db(r, 1) = Channel_list(r); % Channel number
    Channel_db(r, 2) = 0;                % Status (0=Available, 1=Assigned)
    Channel_db(r, 3) = 0;                % Success assignments
    Channel_db(r, 4) = 0;                % Fail assignments
    Channel_db(r, 5) = 0;                % User id
end

Assign_error = 0; Assign_success = 0;

Channel_black_list = zeros(Best_channels, 1);

if isempty(Qos_channels) == 0
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] >>> Start of QoS assignment <<<']);

    Qos_assign_error = 0; Qos_assign_success = 0; Qos_user_no_channel = 0;

    Qos_user_table = zeros(size(Qos_channels, 1), size(Qos_channels, 2));

    Qos_channel_sequence = 1;
    for User = 1:length(Qos_users)
        Sequence_size = ...
            find(Qos_channels(Qos_channel_sequence, :) == 0, 1, ...
                'first') - 1;
        for Channel = 1:Sequence_size
            Qos_user_table(User, Channel) = ...
                Qos_channels(Qos_channel_sequence, Channel);
            Channel_db_index = find(Channel_db(:, 1) == ...
                Qos_channels(Qos_channel_sequence, Channel));
            Channel_db(Channel_db_index, 2) = 1;
        end
        Qos_user_list(User) = Qos_users(User);
        Qos_users(User) = 0;
        Qos_channel_sequence = Qos_channel_sequence + 1;
        if Qos_channel_sequence > size(Qos_channels, 1)

```

```

disp(['[', num2str(Timestamp), ...
      '] WARNING: End of QoS channel list has been reached']);
Barred_qos_users = find(Qos_users ~= 0);
if isempty(Barred_qos_users) == 0
    disp(['[', num2str(Timestamp), ...
          '] WARNING: No QoS channels for the ', ...
          'following users: ', ...
          num2str(Qos_users(Barred_qos_users))]);
disp(['[', num2str(Timestamp), ...
      '] WARNING: Regular channels will be assigned to ', ...
      'barred QoS users']);
Qos_user_no_channel = Qos_user_no_channel + ...
    length(Barred_qos_users);
end
break
end
end
end

```

```

[Instant_time, Time_table] = D_instant_occupation(Band_vector, ...
    Channels, Best_channels, Sort_mode);

```

```

for User = 1:length(Qos_user_list)
    Sequence_success = 0;
    while Sequence_success < 2
        Sequence_size = find(Qos_user_table(User, :) == 0, 1, ...
            'first') - 1;
        for Channel = 1:Sequence_size
            if Time_table(1, Qos_user_table(User, Channel)) - ...
                Instant_time <= 0
                if Sequence_success == 1
                    Channel_db(Channel_db_index, 2) = 0;
                    Channel_db(Channel_db_index, 5) = 0;
                    Sequence_success = 0;
                end
                Assign_error = Assign_error + 1;
                Channel_db_index = find(Channel_db(:, 1) == ...
                    Qos_user_table(User, Channel));
                Channel_db(Channel_db_index, 2) = 0;
                Channel_db(Channel_db_index, 4) = ...
                    Channel_db(Channel_db_index, 4) + 1;
            else
                Sequence_success = Sequence_success + 1;
                Assign_success = Assign_success + 1;
                Channel_db_index = find(Channel_db(:, 1) == ...

```

```

        Qos_user_table(User, Channel));
    Channel_db(Channel_db_index, 3) = ...
        Channel_db(Channel_db_index, 3) + 1;
    Channel_db(Channel_db_index, 2) = 1;
    Channel_db(Channel_db_index, 5) = Qos_user_list(User);
end

if Sequence_success == 0
    disp(['[', num2str(Timestamp), ...
        '] QoS assignment failed for user ', ...
        num2str(Qos_user_list(User))]);
    Qos_assign_error = Qos_assign_error + 1;

elseif Sequence_success == 1 && Channel == Sequence_size
    Channel_db(Channel_db_index, 2) = 0;
    Channel_db(Channel_db_index, 5) = 0;
    Sequence_success = 0;

elseif Sequence_success >= 2 && Channel == Sequence_size
    Channel_index = ...
        find(Channel_db(:, 5) == Qos_user_list(User));
    Channel_number = Channel_db(Channel_index, 1);
    User_band = 0;
    for Index = 1:length(Channel_number)
        if Channel_number(Index) >= 1 && ...
            Channel_number(Index) <= 800
            % TETRA band channel (25 kHz)
            User_band = User_band + 25;
        else
            % Other bands (200 kHz)
            User_band = User_band + 200;
        end
    end
    end
    Qos_assign_success = Qos_assign_success + 1;
    disp(['[', num2str(Timestamp), ...
        '] QoS assignment succeed for user ', ...
        num2str(Qos_user_list(User)), '. Channels: ' ...
        num2str(Channel_number'), ' (' , ...
        num2str(User_band), ' kHz)']);

    break
end

if Channel == Sequence_size && ...

```

```

        Qos_channel_sequence <= size(Qos_channels, 1)
        Qos_user_table(User, :) = ...
            Qos_channels(Qos_channel_sequence, :);
        Qos_channel_sequence = Qos_channel_sequence + 1;
    elseif Channel == Sequence_size
        disp(['[', num2str(Timestamp), ...
            '] WARNING: No QoS channel for user ', ...
            num2str(Qos_user_list(User))]);
        Qos_assign_error = Qos_assign_error + 1;
        Sequence_success = 2;

        [Instant_time, Time_table] = ...
            D_instant_occupation(Band_vector, Channels, ...
                Best_channels, Sort_mode);
    end
end
end
end
disp(['[', num2str(Timestamp), '] >>> End of QoS assignment <<<']);

Qos_assign_success_rate = Qos_assign_success/(Qos_assign_success + ...
    Qos_assign_error);

save('Qos_assign_success', 'Qos_assign_success');
save('Qos_assign_error', 'Qos_assign_error');
save('Qos_assign_success_rate', 'Qos_assign_success_rate');
save('Qos_user_no_channel', 'Qos_user_no_channel');

if strcmp(Qos_users_plot,'yes') == 1 && ...
    length(Qos_user_list) > 5 && length(Qos_user_list) < 15 && ...
    exist('Qos_users_plot.mat', 'file') == 0
    figure('Name', 'QoS users');
    title(strcat('Number of QoS users: ', ...
        num2str(length(Qos_user_list))), 'FontSize', 12);
    hold on; grid on;
    xlabel('Channel number', 'fontsize', 12);
    ylabel('User number', 'fontsize', 12);
    Qos_matrix = zeros(length(Qos_user_list), size(Qos_user_table, 2));
    for User = 1:length(Qos_user_list)
        Channel_index = find(Channel_db(:, 5) == Qos_user_list(User));
        Qos_matrix(User, 1:length(Channel_index)) = ...
            Channel_db(Channel_index, 1);
        Sequence_size = find(Qos_matrix(User, :) == 0, 1,'first') - 1;
        plot(Qos_matrix(User,1:Sequence_size), Qos_user_list(User), ...

```

```

        '--rs', 'Linewidth', 2, 'MarkerEdgeColor', 'k', ...
        'MarkerFaceColor', 'g', 'MarkerSize',10);
    end
    save('Qos_users_plot', 'Qos_matrix');
end
else
    Qos_user_list = [];
end

Reserved_channels = find(Channel_db(:, 2) == 1);
Available_channels = length(Channel_list) - length(Reserved_channels);
Regular_users = Users - length(Qos_users);
if Regular_users >= Available_channels
    Channels_user = 1;
else
    if Available_channels/Regular_users < Channels_user
        Channels_user = round(Available_channels/Regular_users);
        if Channels_user*Users >= Available_channels
            Channels_user = Channels_user - 1;
        end
        if Channels_user == 0
            Channels_user = 1;
        end
    end
end

clear User_table
User_no_channel = 0;
if Users > length(Channel_list)
    User_table = zeros(length(Channel_list), Channels_user);
else
    User_table = zeros(Users, Channels_user);
end
for User = 1:Users
    if isempty(find(Qos_user_list == User, 1)) == 1
        if isempty(find(Channel_db(:, 2) == 0, 1, 'first')) == 1
            disp(['[', num2str(Timestamp), '] WARNING: User ', ...
                num2str(User), ' rejected! No channels available.']);
            User_no_channel = User_no_channel + 1;
        end
    end
    Assign_counter = 0; User_table_index = 1;
    Channel_db_index = find(Channel_db(:, 2) == 0, 1, 'first');
    while Assign_counter < Channels_user && ...
        Channel_db_index <= length(Channel_list)

```



```

        if Channel_db(Channel_db_index, 2) == 0
            User_table(User, User_table_index) = ...
                Channel_db(Channel_db_index, 1);
            Channel_db(Channel_db_index, 2) = 1;
            Assign_counter = Assign_counter + 1;
            User_table_index = ...
                User_table_index + 1;
            Channel_db_index = Channel_db_index + Users;
        else
            Channel_db_index = Channel_db_index + Users;
        end
    end
end
end

end

end

[Users, ~] = size(User_table);

[Instant_time, Time_table] = D_instant_occupation(Band_vector, Channels,...
    Best_channels, Sort_mode);

disp(['[', num2str(Timestamp), '] >>> Start of regular assignment <<<']);

for User = 1:Users
    if isempty(find(Qos_user_list == User, 1)) == 1
        User_table_index = 1; User_list_fail = 0;
        Assign_persistent_error = 0;
        Channel_db_index = find(Channel_db(:, 1) == ...
            User_table(User, User_table_index));
        while User_table_index <= Channels_user || ...
            Channel_db_index >= length(Channel_list)

            if User_table(User, User_table_index) == 0
                disp(['[', num2str(Timestamp), ...
                    '] WARNING: Zero value found in user table, user ', ...
                    num2str(User), ' [', ...
                    num2str(User_table_index), ']'']);
                New_channel_index = find(Channel_db(:,2) == 0, 1, 'first');
                if isempty(New_channel_index) == 1
                    disp(['[', num2str(Timestamp), ...
                        '] WARNING: Channel for user ', num2str(User), ...
                        ' was missed']);
                    User_no_channel = User_no_channel + 1;
                    break
                end
            end
        end
    end
end

```

```

end

Channel_db(New_channel_index, 2) = 1;
User_table(User, User_table_index) = ...
    Channel_db(New_channel_index, 1);
disp(['[', num2str(Timestamp), ...
    '] WARNING: Channel ', ...
    num2str(Channel_db(New_channel_index, 1)), ...
    ' added to user table, user ', num2str(User), ...
    ' [', num2str(User_table_index), ']'']);
end

if Time_table(1, User_table(User, User_table_index)) - ...
    Instant_time <= 0

Assign_error = Assign_error + 1;

Channel_black_list(find(Channel_black_list == 0, 1, ...
    'first')) = Channel_db(Channel_db_index, 1);

Channel_gray_list_index = ...
    find(Channel_db(:, 2) == 0);
Channel_gray_list = ...
    Channel_db(Channel_gray_list_index);

Index = 1;
for Channel = 1:length(Channel_gray_list)
    if isempty(find(Channel_gray_list == ...
        Channel_black_list(Channel))) == 1
        Channel_white_list(Index, 1) = ...
            Channel_gray_list(Channel);
        Index = Index + 1;
    end
end

disp(['[', num2str(Timestamp), ...
    '] Assignment error: user ', num2str(User), ...
    ', channel ', ...
    num2str(Channel_db(Channel_db_index, 1))]);
Channel_db(Channel_db_index, 4) = ...
    Channel_db(Channel_db_index, 4) + 1;
User_table_index = User_table_index + 1;

if User_table_index > Channels_user

```

```

if User_list_fail == 0
    User_list_fail = User_list_fail + 1;
    if isempty(find(Channel_db(:, 2) == 0, 1, ...
        'first')) == 1
        disp(['[', num2str(Timestamp), ...
            '] WARNING: No channel found for user ', ...
            num2str(User)]);
        User_no_channel = User_no_channel + 1;
        break
    else
        if Channels_user >= 3
            [Instant_time, Time_table] = ...
                D_instant_occupation(Band_vector, ...
                    Channels, Best_channels, Sort_mode);

            disp(['[', num2str(Timestamp), ...
                '] WARNING: Time table has been updated']);
        end

        if isempty(Channel_white_list) == 1
            Channel_db_index = ...
                find(Channel_db(:, 2) == 0, 1, 'first');
        else
            Channel_db_index = ...
                find(Channel_db(:, 1) == ...
                    Channel_white_list(1));
        end
    end
end
else
    Channel_db_index = Channel_db_index + 1;

    Assign_persistent_error = ...
        Assign_persistent_error + 1;
    if Assign_persistent_error > 10
        disp(['[', num2str(Timestamp), ...
            '] WARNING: Persistent error detected', ...
            '. Time table updated']);
        [Instant_time, Time_table] = ...
            D_instant_occupation(Band_vector, ...
                Channels, Best_channels, Sort_mode);
    end

    while Channel_db_index < length(Channel_list) &&...
        Channel_db(Channel_db_index, 2) == 1

```

```

        Channel_db_index = Channel_db_index + 1;
    end
    if Channel_db_index > length(Channel_list)
        disp(['[', num2str(Timestamp), ...
            '] WARNING: No channel found for user ', ...
            num2str(User)]);
        User_no_channel = User_no_channel + 1;

        for Channel_index = 1:Channels_user
            Channel_db_index = ...
                find(Channel_db(:, 1) == ...
                    User_table(User, Channel_index));
            Channel_db(Channel_db_index, 2) = 0;
            Channel_db(Channel_db_index, 5) = 0;
        end
        break
    end
end

User_table_index = User_table_index - 1;
User_table(User, User_table_index) = ...
    Channel_db(Channel_db_index, 1);
else
    Channel_db_index = find(Channel_db(:, 1) == ...
        User_table(User, User_table_index));
end

else
    disp(['[', num2str(Timestamp), ...
        '] Assignment succeed for user ', ...
        num2str(User), ', channel ', ...
        num2str(Channel_db(Channel_db_index, 1))]);
    Channel_db(Channel_db_index, 3) = ...
        Channel_db(Channel_db_index, 3) + 1;
    Channel_db(Channel_db_index, 2) = 1;
    Channel_db(Channel_db_index, 5) = User;
    Assign_success = Assign_success + 1;

    if exist('Release_backup_channel.mat', 'file') == 2
        for Channel_index = 1:Channels_user
            if Channel_index ~= User_table_index
                Channel_db_index = find(Channel_db(:, 1) == ...
                    User_table(User, Channel_index));
                Channel_db(Channel_db_index, 2) = 0;
            end
        end
    end
end

```


Apêndice E - Código do MDE

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% PUCRS - FENG
% Mestrado em Engenharia Elétrica - 2014/1
%
% ALOCAÇÃO DE CANAIS EM UMA REDE DE RÁDIOS COGNITIVOS GERENCIADA POR BASE
% DE DADOS PREDITIVA ADAPTATIVA
%
% Author: Sandro Machado Ribeiro
%
%
% INSTANT SPECTRUM OCCUPATION
%
% Version   Date       Notes
% 1.1       24/07/14
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [Instant_time, Time_table] = D_instant_occupation(Band_vector, ...
    Channels, Best_channels, Sort_mode)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% MAIN
%

disp(['[', num2str(Timestamp), ...
    '] Generating instant spectrum occupation...']);

for Band = 1:length(Band_vector)
    [Idle_busy_file] = D_spectrum_data(1, Band_vector(Band));

    if strcmp(Band_vector(Band), 'DCS1800DL') == 1
        [~, Columns] = size(importdata(Idle_busy_file));
        while Columns ~= 375
            Error = strcat(Idle_busy_file, '.error');
            save(Error, 'Idle_busy_file', '-ASCII');
            delete(Idle_busy_file);
        end
    end
end
```

```

        [Idle_busy_file] = D_spectrum_data(1, Band_vector(Band));
        [~, Columns] = size(importdata(Idle_busy_file));
    end
elseif strcmp(Band_vector(Band), 'TETRADL') == 1
    [~, Columns] = size(importdata(Idle_busy_file));
    while Columns ~= 400
        Error = strcat(Idle_busy_file, '.error');
        save(Error, 'Idle_busy_file', '-ASCII');
        delete(Idle_busy_file);
        [Idle_busy_file] = D_spectrum_data(1, Band_vector(Band));
        [~, Columns] = size(importdata(Idle_busy_file));
    end
end

end

[Instant_spectrum, ~] = D_channel_sort('sortoff', Channels, ...
    Best_channels, Sort_mode);

Time_vector = datevec(now);
if exist('Forced_time.mat', 'file') == 2
    Forced_time = importdata('Forced_time.mat');
    Time_vector(4) = Forced_time;
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] WARNING: Instant occupation ', ...
        'forced mode is on. Running time is ', num2str(Time_vector(4)), ...
        ':', num2str(Time_vector(5))]);
end

Instant_time = Time_vector(4)*3600 + Time_vector(5)*60 + ...
    round(Time_vector(6));

[Rows, Columns] = size(Instant_spectrum);
Time_table = zeros(Rows, Columns);
for c = 1:Columns
    for r = 1:Rows
        if r == 1
            Time_table(r, c) = Time_vector(4)*3600 + ...
                Time_vector(5)*60 + ...
                60*(Instant_spectrum(r, c));
        else
            Time_table(r, c) = Time_vector(4)*3600 + ...
                Time_vector(5)*60 + ...
                60*(Instant_spectrum(r, c)) + ...
                60*(Instant_spectrum(r - 1, c));
        end
    end
end
end

```


Apêndice F - Código do MAE

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% PUCRS - FENG
% Mestrado em Engenharia Elétrica - 2014/1
%
% ALOCAÇÃO DE CANAIS EM UMA REDE DE RÁDIOS COGNITIVOS GERENCIADA POR BASE
% DE DADOS PREDITIVA ADAPTATIVA
%
% Author: Sandro Machado Ribeiro
%
%
% MAIN
%
% Version    Date      Notes
% 6.2        22/08/14
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STARTUP
%

clear all;

cd /Users/sandromribeiro/SkyDrive/PUCRS/MATLAB/D/work;

delete skip_congested.mat
delete Release_backup_channel.mat
delete Qos*.mat
delete Forced_time.mat
delete D_idle_busy*.txt
delete D_idle_busy*.error

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% SETTINGS
%

Band_vector = cellstr(['TETRAUL  ','TETRADL  ','GSM900UL  ','GSM900DL  ','...

```

```

        'DCS1800UL';'DCS1800DL']]);

Number_of_files = 24;
Time_duration = 60;

Iterations = 100;

Channels = 1900;

Best_channels = Channels*0.5;

% Execution method:
% full = generate and load spectrum data before assigning users
% assign = use current data to assign users
Execution_method = 'full';

% Channel assign method (sequential/random/db)
Method = 'db';

Channels_user = 5;

% Update channel list based on statistics (yes/no)
Update_channel_list = 'yes';

% Sort mode for channel list (tophour/topidle)
Sort_mode = 'tophour';

% Enable QoS user channel handling for db method (yes/no)
Enable_qos = 'no';

Qos_user_factor = 0.2;

% Self learning mode (on/off).
Self_learning = 'off';

% Release backup channels after assignment success (yes/no)
Release_backup_channel = 'no';

if strcmp(Release_backup_channel, 'yes') == 1
    save('Release_backup_channel', 'Release_backup_channel');
end

% Instant time forced mode (on/off)
Forced_mode = 'off';

```

```

Forced_time = 20;

if strcmp(Forced_mode, 'on') == 1
    save('Forced_time', 'Forced_time');
end

Sequential_channel = randi(Channels);

% Plot channel statistics (eng/brl/no)
Plot_stats = 'brl';

% Import statistics history file (yes/no)
Import_stats = 'no';

% Secondary users generation (yes/no)
Random_users = 'no';
Max_users = 900;

% Skip congested bands (yes/no)
Skip_congested = 'no';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% MAIN
%

diary(strcat('D_main_', num2str(Method), '_', num2str(Timestamp), '.log'));
diary on

disp('-----');
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Settings:']);
disp('-----');

disp(['[', num2str(Timestamp), '] Method: ', Method]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Execution method: ', Execution_method]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Update channel list: ', ...
    Update_channel_list]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Number of channels: ', ...
    num2str(Channels)]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Best channels: ', ...
    num2str(Best_channels)]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Sort mode: ', Sort_mode]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Enable QoS: ', Enable_qos]);

```

```

disp(['[', num2str(Timestamp), '] QoS user factor: ', ...
      num2str(Qos_user_factor)]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Self learning: ', self_learning]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Release backup channel: ', ...
      Release_backup_channel]);

disp(['[', num2str(Timestamp), '] Import statistics: ', Import_stats]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Random users: ', Random_users]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] User maximum: ', num2str(Max_users)]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Skip congested: ', Skip_congested]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Forced mode: ', Forced_mode]);
disp('-----');

if strcmp(Execution_method,'full') == 1 && strcmp(Method, 'db') == 1 && ...
    strcmp(Self_learning, 'off') == 1
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] Generating spectrum data (', ...
          num2str(Number_of_files), ' files of ', ...
          num2str(Time_duration), ' minutes per band)...']);
    for Round = 1:Number_of_files
        for Band = 1:length(Band_vector)
            D_spectrum_data(Time_duration, Band_vector(Band));
        end
    end

    if strcmp(Skip_congested, 'yes') == 1
        save('Skip_congested', 'Skip_congested');
    end

    [Spectrum, Channel_list_matrix] = D_channel_sort('sorton', Channels,...
        Best_channels, Sort_mode);
    save('Channel_list_matrix', 'Channel_list_matrix');
end

if isempty(dir(strcat('Channel_stats_', ...
    num2str(Method), '*.mat'))) == 1 || strcmp(Import_stats, 'no') == 1
    Channel_stats = zeros(Channels, 4);
    disp(['[', num2str(Timestamp), ...
          '] A new statistics file was created ']);
elseif strcmp(Import_stats, 'yes') == 1
    Channel_stats_file = dir(strcat('Channel_stats_', num2str(Method),...
        '*.mat'));
    Channel_stats = importdata(Channel_stats_file.name);
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] A statistics file was imported: ',...
          num2str(Channel_stats_file.name)]);
end

```

```

save(strcat(Channel_stats_file.name, '.done'), 'Channel_stats');
delete(Channel_stats_file.name);
end

if strcmp(Method, 'db') == 1
    if strcmp(Self_learning, 'on') == 1
        disp(['[', num2str(Timestamp),'] Self learning mode set ', ...
            'target channels to ', num2str(Best_channels)]);
        if strcmp(Skip_congested, 'no') == 1
            Channel_list = randperm(Channels, Best_channels);
        elseif strcmp(Skip_congested, 'yes') == 1
            if Best_channels > 400
                Channel_list = randperm(400, 400);
                Channel_rest = Best_channels - 400;
                if Channel_rest > 175
                    Channel_list(401:575) = 801:975;
                    Channel_rest = Best_channels - 400 - 175;
                    if Channel_rest > 375
                        disp(['[', num2str(Timestamp),'] [WARNING] Self ',...
                            'learning mode: limit of channel list has ',...
                            'been reached']);
                        Channel_list(576:950) = 1151:1525;
                    else
                        Channel_list(576:575 + Channel_rest) = ...
                            1151:1150 + Channel_rest;
                    end
                else
                    Channel_list(401:400 + Channel_rest) = ...
                        801:800 + Channel_rest;
                end
            else
                Channel_list = randperm(Best_channels, Best_channels);
            end
        end
    end
else
    if exist('Channel_list_matrix', 'var') == 0
        Channel_list_matrix_file = dir(strcat('Channel_list_matrix*'));
        Channel_list_matrix = ...
            importdata(Channel_list_matrix_file(end).name);
        disp(['[', num2str(Timestamp),',...
            '] Channel list matrix imported from file ',...
            num2str(Channel_list_matrix_file(end).name)]);
    end
    if size(Channel_list_matrix, 1) == 24

```

```

Time_vector = datevec(now);
Instant_time = Time_vector(4)*3600 + Time_vector(5)*60 + ...
    round(Time_vector(6));
if Instant_time < 3600
    Channel_list = Channel_list_matrix(1, :);
elseif Instant_time > 3600 && Instant_time < 7200
    Channel_list = Channel_list_matrix(2, :);
elseif Instant_time > 7200 && Instant_time < 10800
    Channel_list = Channel_list_matrix(3, :);
elseif Instant_time > 10800 && Instant_time < 14400
    Channel_list = Channel_list_matrix(4, :);
elseif Instant_time > 14400 && Instant_time < 18000
    Channel_list = Channel_list_matrix(5, :);
elseif Instant_time > 18000 && Instant_time < 21600
    Channel_list = Channel_list_matrix(6, :);
elseif Instant_time > 21600 && Instant_time < 25200
    Channel_list = Channel_list_matrix(7, :);
elseif Instant_time > 25200 && Instant_time < 28800
    Channel_list = Channel_list_matrix(8, :);
elseif Instant_time > 28800 && Instant_time < 32400
    Channel_list = Channel_list_matrix(9, :);
elseif Instant_time > 32400 && Instant_time < 36000
    Channel_list = Channel_list_matrix(10, :);
elseif Instant_time > 36000 && Instant_time < 39600
    Channel_list = Channel_list_matrix(11, :);
elseif Instant_time > 39600 && Instant_time < 43200
    Channel_list = Channel_list_matrix(12, :);
elseif Instant_time > 43200 && Instant_time < 46800
    Channel_list = Channel_list_matrix(13, :);
elseif Instant_time > 46800 && Instant_time < 50400
    Channel_list = Channel_list_matrix(14, :);
elseif Instant_time > 50400 && Instant_time < 54000
    Channel_list = Channel_list_matrix(15, :);
elseif Instant_time > 54000 && Instant_time < 57600
    Channel_list = Channel_list_matrix(16, :);
elseif Instant_time > 57600 && Instant_time < 61200
    Channel_list = Channel_list_matrix(17, :);
elseif Instant_time > 61200 && Instant_time < 64800
    Channel_list = Channel_list_matrix(18, :);
elseif Instant_time > 64800 && Instant_time < 68400
    Channel_list = Channel_list_matrix(19, :);
elseif Instant_time > 68400 && Instant_time < 72000
    Channel_list = Channel_list_matrix(20, :);
elseif Instant_time > 72000 && Instant_time < 75600

```

```

        Channel_list = Channel_list_matrix(21, :);
    elseif Instant_time > 75600 && Instant_time < 79200
        Channel_list = Channel_list_matrix(22, :);
    elseif Instant_time > 79200 && Instant_time < 82800
        Channel_list = Channel_list_matrix(23, :);
    elseif Instant_time > 82800 && Instant_time < 86400
        Channel_list = Channel_list_matrix(24, :);
    end
else
    Channel_list = Channel_list_matrix;
end
end
save(strcat('Channel_list_', num2str(Method)), 'Channel_list');
end

Assign_error_counter = zeros(1, Iterations);
Assign_success_counter = zeros(1, Iterations);
Assign_success_rate_counter = zeros(1, Iterations);
Qos_assign_error_counter = zeros(1, Iterations);
Qos_assign_success_counter = zeros(1, Iterations);
Qos_assign_success_rate_counter = zeros(1, Iterations);
Qos_total_sequences_counter = zeros(1, Iterations);
User_no_channel_counter = zeros(1, Iterations);
Qos_user_no_channel_counter = zeros(1, Iterations);
Channel_list_history = zeros(Iterations, Best_channels);
Total_regular_users = zeros(1, Iterations);
Total_qos_users = zeros(1, Iterations);
for Round = 1:Iterations
    disp(['[', num2str(Timestamp),'] Iteration number ', num2str(Round),...
        ' of ', num2str(Iterations)]);

    if strcmp(Method, 'sequential') == 1
        disp(['[', num2str(Timestamp),'] Start channel is ',...
            num2str(Sequential_channel)]);
        Channels_user = 1;
        Channel_list = zeros(Best_channels, 1);
        r = 1;
        while r <= Best_channels
            if strcmp(Skip_congested, 'yes') == 1
                % Skip congested bands
                if Sequential_channel == 401
                    Sequential_channel = 801;
                elseif Sequential_channel == 976
                    Sequential_channel = 1151;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        elseif Sequential_channel == 1526
            Sequential_channel = 1;
        end
    end
    if Sequential_channel > Channels
        % When it reaches channel 1900
        Sequential_channel = 1;
        Channel_list(r, 1) = Sequential_channel;
        Sequential_channel = Sequential_channel + 1;
        r = r + 1;
    else
        Channel_list(r, 1) = Sequential_channel;
        Sequential_channel = Sequential_channel + 1;
        r = r + 1;
    end
end

elseif strcmp(Method, 'random') == 1
    Channels_user = 1;
    Channel_list = zeros(Best_channels, 1);
    for Channel = 1:Best_channels
        Random_number = randi(Channels);
        if strcmp(Skip_congested, 'yes') == 1
            while isempty(find(Channel_list == ...
                Random_number, 1)) == 0 || ...
                Random_number > 401 && Random_number < 801 || ...
                Random_number > 976 && Random_number < 1151 || ...
                Random_number > 1526 && Random_number < 1901
                Random_number = randi(Channels);
            end
        else
            while isempty(find(Channel_list == Random_number, 1)) == 0
                Random_number = randi(Channels);
            end
        end
        Channel_list(Channel, 1) = Random_number;
    end

elseif strcmp(Method, 'db')
    if isempty(dir(strcat('Channel_list_', ...
        num2str(Method), '*.mat')))) == 0
        Channel_list_file = dir(strcat('Channel_list_', ...
            num2str(Method), '*'));
        Channel_list = importdata(Channel_list_file(end).name);
    end
end

```



```

end
end

if strcmp(Enable_qos, 'yes') == 1 && strcmp(Method, 'db') == 1
    clear Channel_sequence
    Sequence = 1; Row = 1; Channel_list_index = 1;
    Sequence_counter = 0;
    Channel_number = Channel_list(Channel_list_index);
    while Channel_list_index <= length(Channel_list)
        if Channel_list(Channel_list_index) == Channel_number
            Channel_sequence(Sequence, Row) = ...
                Channel_list(Channel_list_index);
            Channel_list_index = Channel_list_index + 1;
            Channel_number = Channel_number + 1;
            Row = Row + 1;
            Sequence_counter = Sequence_counter + 1;
        else
            if Sequence_counter > 1
                Sequence = Sequence + 1;
            end
            Row = 1;
            Sequence_counter = 0;
            Channel_number = Channel_list(Channel_list_index);
        end
    end
    Channel_sequence(:, end + 1) = 0; % Add a zero marker
    Sequence_size = find(Channel_sequence(end,:) == 0, 1, 'first') - 1;
    if Sequence_size == 1
        Channel_sequence = Channel_sequence(1:end - 1, :);
    end

    if isempty(Channel_sequence) == 1
        disp(['[', num2str(Timestamp), ...
            '] WARNING: No channels for QoS users']);
        Qos_channels = [];
        Qos_assign_error_counter(Round) = 0.0077;
        Qos_assign_success_counter(Round) = 0.0077;
        Qos_assign_success_rate_counter(Round) = 0.0077;
        Qos_total_sequences_counter(Round) = 0;
    else
        clear Bandwidth
        Bandwidth = zeros(size(Channel_sequence, 1), 1);
        for Sequence = 1:size(Channel_sequence, 1)
            Sequence_size = ...

```

```

        find(Channel_sequence(Sequence,:) == 0, 1, 'first') - 1;
    for Channel = 1:Sequence_size
        if Channel_sequence(Sequence, Channel) >= 1 && ...
            Channel_sequence(Sequence, Channel) <= 800
            Bandwidth(Sequence, 1) = ...
                Bandwidth(Sequence, 1) + 25;
        else
            Bandwidth(Sequence, 1) = ...
                Bandwidth(Sequence, 1) + 200;
        end
    end
end

clear Qos_channels Sorted_bw_index Bandwidth_index
Bandwidth_index = find(Bandwidth > 200);
if isempty(Bandwidth_index) == 0
    Qos_channels = Channel_sequence(Bandwidth_index, :);
else
    disp(['[', num2str(Timestamp), ...
        '] WARNING: No QoS channels with band greater ', ...
        'than 200 kHz']);
    Qos_channels = [];
    Qos_assign_error_counter(Round) = 0.0077;
    Qos_assign_success_counter(Round) = 0.0077;
    Qos_assign_success_rate_counter(Round) = 0.0077;
    Qos_total_sequences_counter(Round) = 0;
end

Qos_total_sequences_counter(Round) = size(Qos_channels, 1);
end
end

if strcmp(Random_users, 'yes') == 1
    Users = randi(Max_users);
else
    Users = Max_users;
end

if strcmp(Enable_qos, 'yes') == 1 && strcmp(Method, 'db') == 1
    Qos_users = randperm(Users, round(Qos_user_factor*Users));
    if isempty(Qos_users) == 1
        Qos_users = 1;
    end
else
    Qos_channels = [];
end

```

```

    Qos_users = [];
end
Total_regular_users(Round) = Users - length(Qos_users);
Total_qos_users(Round) = length(Qos_users);

if isempty(Qos_channels) == 1 && isempty(Qos_users) == 0
    Qos_user_no_channel_counter(Round) = Total_qos_users(Round);
end

[Channel_db, User_table, Assign_error, Assign_success, ...
    User_no_channel, Assign_success_rate] = ...
    D_channel_assign(Channel_list, Users, Channels_user, Channels, ...
        Best_channels, Sort_mode, Qos_channels, Qos_users);

Assign_error_counter(Round) = Assign_error;
Assign_success_counter(Round) = Assign_success;
Assign_success_rate_counter(Round) = Assign_success_rate;
User_no_channel_counter(Round) = User_no_channel;

if exist('Qos_assign_error.mat', 'file') == 2
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] Importing QoS counters...']);
    Qos_assign_error_counter(Round) = ...
        importdata('Qos_assign_error.mat');
    delete Qos_assign_error.mat
    Qos_assign_success_counter(Round) = ...
        importdata('Qos_assign_success.mat');
    delete Qos_assign_success.mat
    Qos_assign_success_rate_counter(Round) = ...
        importdata('Qos_assign_success_rate.mat');
    delete Qos_assign_success_rate.mat
    Qos_user_no_channel_counter(Round) = ...
        importdata('Qos_user_no_channel.mat');
    delete Qos_user_no_channel.mat
end

for r = 1:length(Channel_db)
    Channel = Channel_db(r, 1);
    Channel_stats(Channel, 1) = Channel;
    Channel_stats(Channel, 2) = Channel_stats(Channel, 2) + ...
        Channel_db(r, 3);
    Channel_stats(Channel, 3) = Channel_stats(Channel, 3) + ...
        Channel_db(r, 4);
    if Channel_stats(Channel, 2) == 0 && ...
        Channel_stats(Channel, 3) == 0 && ...

```

```

        Channel_stats(Channel, 1) ~= 0
        Channel_stats(Channel, 4) = 0.7777;
    else
        Channel_stats(Channel, 4) = Channel_stats(Channel, 2)/ ...
            (Channel_stats(Channel, 2) + Channel_stats(Channel, 3));
    end
end
end

if strcmp(Method, 'db') == 1 && strcmp(Update_channel_list, 'yes') == 1
    Channel_list_history(Round, :) = Channel_list;
    [~, Temp_list] = sort(Channel_stats(:, 4), 'descend');
    Index = 1; Channel = 1;
    while Index < Best_channels + 1
        Channel_list(Index) = Temp_list(Channel);
        Index = Index + 1;
        Channel = Channel + 1;
    end
    save(strcat('Channel_list_', num2str(Method)), 'Channel_list');
end
end

Assign_error_rate_counter = ...
    Assign_error_counter./(Assign_error_counter + Assign_success_counter);
Qos_assign_error_rate_counter = Qos_assign_error_counter./ ...
    (Qos_assign_error_counter + Qos_assign_success_counter);

save('Assign_error_counter', 'Assign_error_counter');

save(strcat('Channel_stats_', num2str(Method)), 'Channel_stats');

if strcmp(Plot_stats, 'eng') == 1
    figure('Name', strcat(Method, ' method'));

    subplot(221), ...
        title(strcat('Update channel list=', ...
            num2str(Update_channel_list), ...
            ', Self learning=', num2str(Self_learning), ...
            ', Execution method=', num2str(Execution_method), ...
            ', Iterations=', num2str(Iterations), ...
            ', Sort mode=', num2str(Sort_mode)), 'FontSize', 12);
    hold on; grid on;
    plot(Channel_stats(:, 2), 'b');
    plot(Channel_stats(:, 3), 'r');
    legend('channel seizure succeed', 'channel seizure failed', ...

```

```

        'Location', 'Best');
xlabel('Channel number', 'fontsize',12);
ylabel('Attempts (n)', 'fontsize',12);

subplot(222), ...
title(strcat('Channel success rate=', num2str(100*(sum(...
    Channel_stats(:, 2))/(sum(Channel_stats(:, 2)) + sum(...
    Channel_stats(:, 3))))), '%, Number of channels=',...
    num2str(Best_channels), ', Release backup channel=', ...
    Release_backup_channel), 'FontSize', 12);
hold on; grid on;
Channel_stats_index = find(Channel_stats(:, 4) ~= 0.7777);
set(stem(Channel_stats_index, ...
    100*(Channel_stats(Channel_stats_index, 4)), '.'), ...
    'linewidth', 1);
xlabel('Channel number','fontsize',12);
ylabel('Rate (%)','fontsize',12);

subplot(223), ...
title(strcat('User assign rate=', ...
    num2str(100*((sum(Total_regular_users) - ...
    sum(User_no_channel_counter))/sum(Total_regular_users))), ...
    '%, Total users=', num2str(sum(Total_regular_users)), ...
    ', Not assigned users=', ...
    num2str(sum(User_no_channel_counter)), ', Max users=', ...
    num2str(Max_users)), 'FontSize', 12);
hold on; grid on;
plot(1:Iterations, (Assign_success_counter + ...
    Assign_error_counter), 'b', 'Linewidth', 2);
plot(1:Iterations, Assign_success_counter, 'g', 'Linewidth', 2);
plot(1:Iterations, Assign_error_counter, 'r', 'Linewidth', 2);
legend('Total attempts', 'Assign success', 'Assign fail', ...
    'Location', 'Best');
xlabel('Iterations','fontsize',12);
ylabel('Attempts (n)','fontsize',12);

subplot(224), ...
title(strcat('Mean user assign success=', ...
    num2str(100*mean(Assign_success_rate_counter)), '%',...
    ', Mean user assign fail=', ...
    num2str(100*mean(Assign_error_rate_counter)), '%'), ...
    'FontSize', 12);
hold on; grid on;
plot(1:Iterations, 100*(Assign_success_rate_counter), ...

```

```

'Linewidth', 2);
plot(1:Iterations, 100*(Assign_error_rate_counter), 'r', ...
'Linewidth', 2);
legend('User assign success (first attempt)', ...
      'User assign fail', 'Location', 'Best');
xlabel('Iterations', 'fontsize', 12);
ylabel('Rate (%)', 'fontsize', 12);

if strcmp(Enable_qos, 'yes') == 1
    figure('Name', 'QoS statistics'); grid on;

    subplot(221), ...
        title('QoS counters', 'FontSize', 12);
        hold on; grid on;
        plot(1:length(Qos_assign_success_counter), ...
            Qos_assign_success_counter, 'g', 'Linewidth', 2);
        plot(1:length(Qos_assign_error_counter), ...
            Qos_assign_error_counter, 'r', 'Linewidth', 2);
        plot(1:length(Qos_total_sequences_counter), ...
            Qos_total_sequences_counter, '-b', 'Linewidth', 2);
        legend('QoS success counter', 'QoS error counter', ...
            'Number of sequences', 'Location', 'Best');
        xlabel('Iterations', 'fontsize', 12);
        ylabel('Attempts (n)', 'fontsize', 12);

    subplot(222), ...
        title(strcat('QoS mean assign success rate=', ...
            num2str(100*mean(Qos_assign_success_rate_counter)), ...
            '%, QoS mean assign error rate = ', ...
            num2str(100*mean(Qos_assign_error_rate_counter)), '%'), ...
            'FontSize', 12);
        hold on; grid on;
        plot(1:length(Qos_assign_success_rate_counter), ...
            100*(Qos_assign_success_rate_counter), 'Linewidth', 2);
        plot(1:length(Qos_assign_error_rate_counter), ...
            100*(Qos_assign_error_rate_counter), 'r', 'Linewidth', 2);
        legend('QoS success rate', 'QoS error rate', 'Location', ...
            'Best');
        xlabel('Iterations', 'fontsize', 12);
        ylabel('QoS assign rate (%)', 'fontsize', 12);

    subplot(223), ...
        title(strcat('QoS user assign rate=', ...
            num2str(100*((sum(Total_qos_users) - ...

```

```

        sum(Qos_user_no_channel_counter))/...
        sum(Total_qos_users))), '%, Total QoS users=', ...
        num2str(sum(Total_qos_users)), ...
        ', Not assigned QoS users = ', ...
        num2str(sum(Qos_user_no_channel_counter))), ...
        'FontSize', 12);
hold on; grid on;
plot(1:length(Total_qos_users), Total_qos_users, '-.b');
plot(1:length(Total_qos_users), (Total_qos_users - ...
    Qos_user_no_channel_counter), 'g', 'Linewidth', 2);
plot(1:length(Qos_user_no_channel_counter), ...
    Qos_user_no_channel_counter, 'r', 'Linewidth', 2);
legend('Total QoS users', 'QoS users assigned', ...
    'QoS users not assigned', 'Location', 'Best');
xlabel('Iterations', 'fontsize', 12);
ylabel('Attempts (n)', 'fontsize', 12);
end

elseif strcmp(Plot_stats, 'br1') == 1
    Channel_counters_figure = figure('Name', 'Contadores dos canais');
    set(gcf, 'color', 'w');
    [worst_channel_errors, worst_channel] = max(Channel_stats(:, 3));
    title({strcat('Atualiza DB=', ...
        num2str(Update_channel_list), ...
        ', Autoaprendizado=', num2str(Self_learning), ...
        ', Método execução=', num2str(Execution_method),...
        ', Iterações=', num2str(Iterations)); ...
        strcat(num2str(Timestamp), ', Base=', num2str(Method), ...
        ', Ordenação=', num2str(Sort_mode), ', Pior canal=', ...
        num2str(worst_channel), ' [' , num2str(worst_channel_errors), ...
        ']' )}, 'FontSize', 12);
    hold on; grid on;
    plot(Channel_stats(:, 2), 'b');
    plot(Channel_stats(:, 3), 'r');
    legend('Sucesso acesso canal', 'Falha acesso canal', ...
        'Location', 'Best');
    xlabel('Índice do canal', 'fontsize', 12);
    ylabel('Tentativas (n)', 'fontsize', 12);
    saveas(Channel_counters_figure, strcat('Channel_counters_', ...
        num2str(Timestamp), '.png'));

    Channel_rate_figure = figure('Name', 'Taxa dos canais');
    set(gcf, 'color', 'w');
    Channel_rate_index = find(Channel_stats(:, 4) ~= 0);

```

```

Channel_rate_table = Channel_stats(Channel_rate_index, :);
[Worst_channel_rate, Worst_channel_rate_index] = ...
    min(Channel_rate_table(:, 4));
title({strcat('Sucesso canal=', num2str(100*(sum(...
    Channel_stats(:, 2))/(sum(Channel_stats(:, 2)) + ...
    sum(Channel_stats(:, 3))))), '%, Total canais=', ...
    num2str(Best_channels), ', Libera canais reserva=', ...
    Release_backup_channel); strcat(num2str(Timestamp), ...
    ', Pior canal=', ...
    num2str(Channel_rate_table(Worst_channel_rate_index)), ' [' , ...
    num2str(100*Worst_channel_rate), '%]')}, 'FontSize', 12);
hold on; grid on;
axis([0 1900 0 110]);
Channel_stats_index = find(Channel_stats(:, 4) ~= 0.7777);
set(stem(Channel_stats_index, ...
    100*(Channel_stats(Channel_stats_index, 4)), '.'), ...
    'linewidth', 1);
xlabel('Índice do canal','fontsize',12);
ylabel('Taxa (%)','fontsize',12);
saveas(Channel_rate_figure, strcat('Channel_rate_', ...
    num2str(Timestamp), '.png'));

User_counters_figure = figure('Name', 'Contadores de usuários');
set(gcf, 'color', 'w');
[Worst_iteration_error, Worst_iteration] = max(Assign_error_counter);
title({strcat(num2str(Timestamp), ', Sucesso usuário=', ...
    num2str(100*((sum(Total_regular_users) - ...
    sum(User_no_channel_counter))/sum(Total_regular_users))), ...
    '%, Total usuários=', num2str(sum(Total_regular_users))); ...
    strcat('Usuários não alocados=', ...
    num2str(sum(User_no_channel_counter)), ', Máximo usuários=', ...
    num2str(Max_users), ', Pior iteração=', ...
    num2str(Worst_iteration), ' [' , num2str(Worst_iteration_error), ...
    ']'')}, 'FontSize', 12);
hold on; grid on;
plot(1:Iterations, (Assign_success_counter + ...
    Assign_error_counter), 'b', 'Linewidth', 2);
plot(1:Iterations, Assign_success_counter, 'g', 'Linewidth', 2);
plot(1:Iterations, Assign_error_counter, 'r', 'Linewidth', 2);
legend('Total detecções', 'Sucesso detecção', 'Falha detecção', ...
    'Location', 'Best');
xlabel('Iterações','fontsize',12);
ylabel('Tentativas (n)','fontsize',12);
saveas(User_counters_figure, strcat('User_counters_', ...

```



```

    num2str(Timestamp), '.png'));

User_rate_figure = figure('Name', 'Taxas de usuário');
set(gcf, 'color', 'w');
[Worst_iteration_rate, Worst_iteration] = ...
    min(Assign_success_rate_counter);
title({strcat(num2str(Timestamp), ', Sucesso detecção=', ...
    num2str(100*mean(Assign_success_rate_counter)), '%'); ...
    strcat('Falha detecção=', ...
    num2str(100*mean(Assign_error_rate_counter)), '%', ...
    ', Pior iteração=', num2str(Worst_iteration), ' [' , ...
    num2str(100*Worst_iteration_rate), '%]')}, ...
    'FontSize', 12);
hold on; grid on;
axis([0 Iterations 0 110]);
plot(1:Iterations, 100*(Assign_success_rate_counter), ...
    'Linewidth', 2);
plot(1:Iterations, 100*(Assign_error_rate_counter), 'r', ...
    'Linewidth', 2);
legend('Sucesso detecção canal (primeira tentativa)', ...
    'Falha detecção canal', 'Location', 'Best');
xlabel('Iterações', 'fontsize', 12);
ylabel('Taxa (%)', 'fontsize', 12);
saveas(User_rate_figure, strcat('User_rate_', ...
    num2str(Timestamp), '.png'));

if strcmp(Enable_qos, 'yes') == 1
    Qos_counters_figure = figure('Name', 'Contadores de QoS');
    set(gcf, 'color', 'w');
    title(strcat(num2str(Timestamp), ', Contadores QoS'), ...
        'FontSize', 12);
    hold on; grid on;
    plot(1:length(Qos_assign_success_counter), ...
        Qos_assign_success_counter, 'g', 'Linewidth', 2);
    plot(1:length(Qos_assign_error_counter), ...
        Qos_assign_error_counter, 'r', 'Linewidth', 2);
    plot(1:length(Qos_total_sequences_counter), ...
        Qos_total_sequences_counter, '.-b', 'Linewidth', 2);
    legend('Sucesso detecção sequência', 'Falha detecção sequência', ...
        'Total de sequências', 'Location', 'Best');
    xlabel('Iterações', 'fontsize', 12);
    ylabel('Tentativas (n)', 'fontsize', 12);
    saveas(Qos_counters_figure, strcat('Qos_counters_', ...
        num2str(Timestamp), '.png'));

```

```

Qos_rate_figure = figure('Name', 'Taxas de QoS');
set(gcf, 'color', 'w');
title({strcat('Sucesso detecção QoS=', ...
    num2str(100*mean(Qos_assign_success_rate_counter)), ...
    '%, Falha detecção QoS=', ...
    num2str(100*mean(Qos_assign_error_rate_counter)), '%'); ...
    num2str(Timestamp)}, 'FontSize', 12);
hold on; grid on;
plot(1:length(Qos_assign_success_rate_counter), ...
    100*(Qos_assign_success_rate_counter), 'Linewidth', 2);
plot(1:length(Qos_assign_error_rate_counter), ...
    100*(Qos_assign_error_rate_counter), 'r', 'Linewidth', 2);
legend('Sucesso detecção canal QoS (primeira tentativa)', ...
    'Falha detecção canal QoS', 'Location', 'Best');
xlabel('Iterações', 'fontsize', 12);
ylabel('Taxa alocação QoS (%)', 'fontsize', 12);
saveas(Qos_rate_figure, strcat('Qos_rate_', ...
    num2str(Timestamp), '.png'));

```

```

Qos_user_figure = figure('Name', 'Usuários de QoS');
set(gcf, 'color', 'w');
title({strcat('Sucesso usuário QoS=', ...
    num2str(100*((sum(Total_qos_users) - ...
    sum(Qos_user_no_channel_counter))/...
    sum(Total_qos_users))), '%, Total usuários QoS=', ...
    num2str(sum(Total_qos_users))}; ...
    strcat(num2str(Timestamp), ', Usuários QoS não alocados= ', ...
    num2str(sum(Qos_user_no_channel_counter)))}, ...
    'FontSize', 12);
hold on; grid on;
plot(1:length(Total_qos_users), Total_qos_users, '-b');
plot(1:length(Total_qos_users), (Total_qos_users - ...
    Qos_user_no_channel_counter), 'g', 'Linewidth', 2);
plot(1:length(Qos_user_no_channel_counter), ...
    Qos_user_no_channel_counter, 'r', 'Linewidth', 2);
legend('Total usuários QoS', 'Usuários QoS alocados', ...
    'Usuários QoS não alocados', 'Location', 'Best');
xlabel('Iterações', 'fontsize', 12);
ylabel('Tentativas (n)', 'fontsize', 12);
saveas(Qos_user_figure, strcat('Qos_user_', ...
    num2str(Timestamp), '.png'));

```

end

end

```

% Final report
disp('-----');
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Final report:']);
disp('-----');
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Channel success rate = ', ...
      num2str(100*(sum(Channel_stats(:, 2))/(sum(Channel_stats(:, 2)) + ...
      sum(Channel_stats(:, 3))))), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Total regular users = ', ...
      num2str(sum(Total_regular_users))]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Not assigned regular users = ', ...
      num2str(sum(User_no_channel_counter))]);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] User assign rate = ', ...
      num2str(100*((Total_regular_users - User_no_channel_counter)/ ...
      Total_regular_users)), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Mean assign success rate = ', ...
      num2str(100*mean(Assign_success_rate_counter)), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Mean assign error rate = ', ...
      num2str(100*mean(Assign_error_rate_counter)), '%']);

if strcmp(Enable_qos, 'yes') == 1
    disp('-----');
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] Total QoS users = ', ...
          num2str(sum(Total_qos_users))]);
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] Not assigned QoS users = ', ...
          num2str(sum(Qos_user_no_channel_counter))]);
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] QoS user assign rate = ', ...
          num2str(100*((Total_qos_users - Qos_user_no_channel_counter)/ ...
          Total_qos_users)), '%']);
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] QoS mean assign success rate = ', ...
          num2str(100*mean(Qos_assign_success_rate_counter)), '%']);
    disp(['[', num2str(Timestamp), '] QoS mean assign error rate = ', ...
          num2str(100*mean(Qos_assign_error_rate_counter)), '%']);
end

% Band statistics
disp('-----');
Tetra_ul = 100*(sum(Channel_stats(1:400, 2))/sum(Channel_stats(:, 2)));
Tetra_dl = 100*(sum(Channel_stats(401:800, 2))/sum(Channel_stats(:, 2)));
Gsm_ul = 100*(sum(Channel_stats(801:975, 2))/sum(Channel_stats(:, 2)));
Gsm_dl = 100*(sum(Channel_stats(976:1150, 2))/sum(Channel_stats(:, 2)));
Dcs_ul = 100*(sum(Channel_stats(1151:1525, 2))/sum(Channel_stats(:, 2)));
Dcs_dl = 100*(sum(Channel_stats(1526:1900, 2))/sum(Channel_stats(:, 2)));

```

```

disp(['[', num2str(Timestamp), '] TETRA UL utilization = ', ...
      num2str(Tetra_ul), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] TETRA DL utilization = ', ...
      num2str(Tetra_dl), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] GSM 900 UL utilization = ', ...
      num2str(Gsm_ul), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] GSM 900 DL utilization = ', ...
      num2str(Gsm_dl), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] DCS 1800 UL utilization = ', ...
      num2str(Dcs_ul), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] DCS 1800 DL utilization = ', ...
      num2str(Dcs_dl), '%']);

Fail_tetra_ul = 100*(sum(Channel_stats(1:400, 3))/ ...
                  sum(Channel_stats(:,3)));
Fail_tetra_dl = 100*(sum(Channel_stats(401:800, 3))/ ...
                  sum(Channel_stats(:, 3)));
Fail_gsm_ul = 100*(sum(Channel_stats(801:975, 3))/ ...
                  sum(Channel_stats(:, 3)));
Fail_gsm_dl = 100*(sum(Channel_stats(976:1150, 3))/ ...
                  sum(Channel_stats(:, 3)));
Fail_dcs_ul = 100*(sum(Channel_stats(1151:1525, 3))/ ...
                  sum(Channel_stats(:,3)));
Fail_dcs_dl = 100*(sum(Channel_stats(1526:1900, 3))/ ...
                  sum(Channel_stats(:, 3)));

disp('-----');
disp(['[', num2str(Timestamp), '] TETRA UL utilization fail = ', ...
      num2str(Fail_tetra_ul), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] TETRA DL utilization fail = ', ...
      num2str(Fail_tetra_dl), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] GSM 900 UL utilization fail = ', ...
      num2str(Fail_gsm_ul), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] GSM 900 DL utilization fail = ', ...
      num2str(Fail_gsm_dl), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] DCS 1800 UL utilization fail = ', ...
      num2str(Fail_dcs_ul), '%']);
disp(['[', num2str(Timestamp), '] DCS 1800 DL utilization fail = ', ...
      num2str(Fail_dcs_dl), '%']);

% Finish command window log file
disp('-----');
disp(['[', num2str(Timestamp), '] Execution finished.']);
diary off

```

```
%  
% END  
%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

A seguir o código de uma função auxiliar utilizada para obter *timestamp*.

```
function [Time_label] = Timestamp  
  
    Rightnow = datevec(now);  
  
    Year = num2str(Rightnow(1));  
    Year = Year(3:4);  
  
    Month = Rightnow(2);  
    if Month < 10  
        Month = strcat('0', num2str(Month));  
    end  
  
    Day = Rightnow(3);  
    if Day < 10  
        Day = strcat('0', num2str(Day));  
    end  
  
    Hour = Rightnow(4);  
    if Hour < 10  
        Hour = strcat('0', num2str(Hour));  
    end  
  
    Minute = Rightnow(5);  
    if Minute < 10  
        Minute = strcat('0', num2str(Minute));  
    end  
  
    Second = round(Rightnow(6));  
    if Second < 10  
        Second = strcat('0', num2str(Second));  
    end  
  
    Time_label = strcat(Year, num2str(Month), num2str(Day), num2str(Hour),  
num2str(Minute), num2str(Second));  
  
end
```

Apêndice G - Análise Pequena Escala

Cenário 1

Na Tabela G.1 são especificados os parâmetros de configuração do programa de simulação para o Cenário 1, considerando um cenário de pequena escala, bem como os resultados da simulação. A Figura G.1 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela G.1 - Parâmetros e resultados do Cenário 1 em situação de pequena escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 100 | fixo | 100 | DB | sim | 760 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 98,11 | 10000 | 0 | 100 | 98,3 | 1,7 |

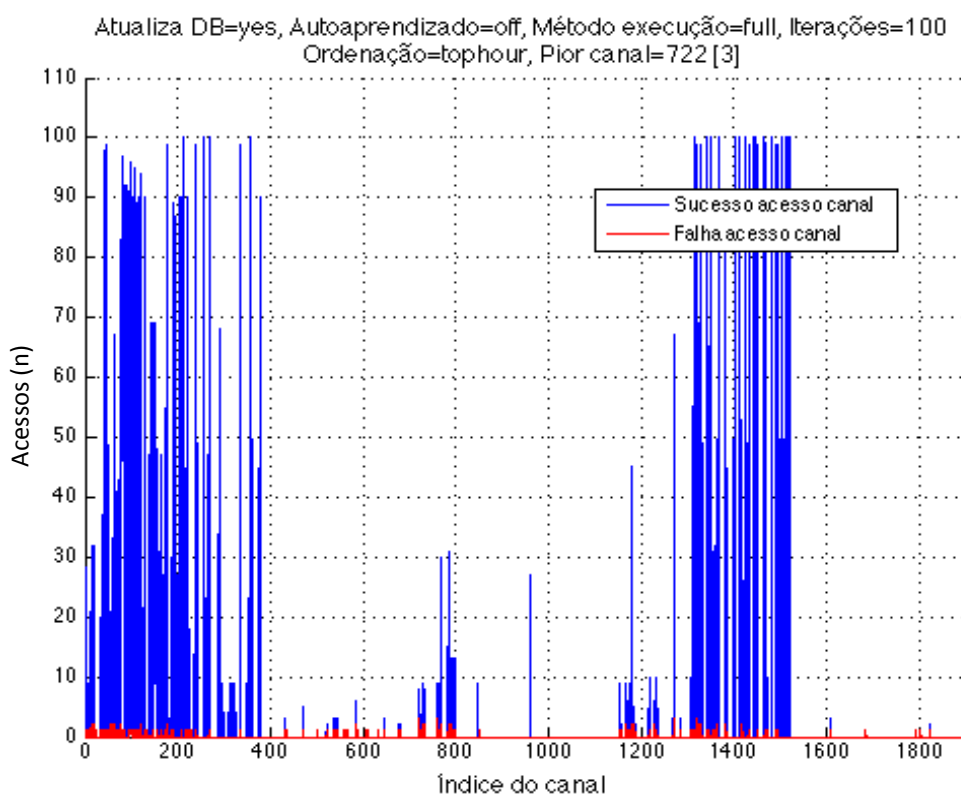
Fonte: o autor.

Na Figura G.1a é possível verificar que a maior parte dos acessos (azul) ficou nas faixas TETRA UL e DCS 1800 UL. Estas estão entre as faixas menos utilizadas no espectro de interesse.

É possível notar também que ocorreram poucas falhas de acesso ao canal nestas bandas (vermelho), justamente em função da baixa utilização. Nas faixas mais congestionadas, o número de acessos foi inferior a 10. O canal com maior número de falhas foi o 722 com 3 falhas.

Figura G.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de pequena escala.

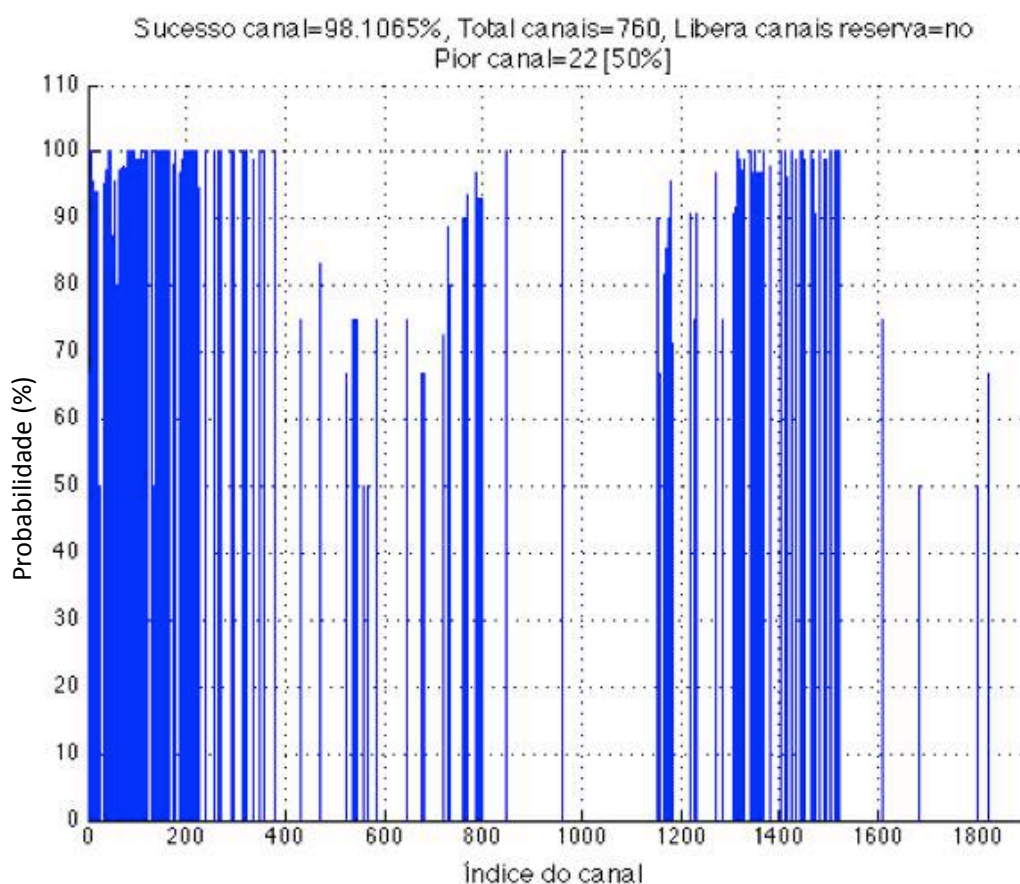
(a) Contadores de acesso aos canais.



Na Figura G.1b pode-se perceber que a maior parte dos canais ficou com probabilidade de sucesso próxima de 100%, sendo que a pior foi de 50%. Um dos canais que apresentou esta probabilidade foi o 22. Quando a probabilidade de sucesso do canal é 100%, significa que todas detecções realizadas neste canal acusaram que o mesmo estava livre.

Figura G.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de pequena escala.

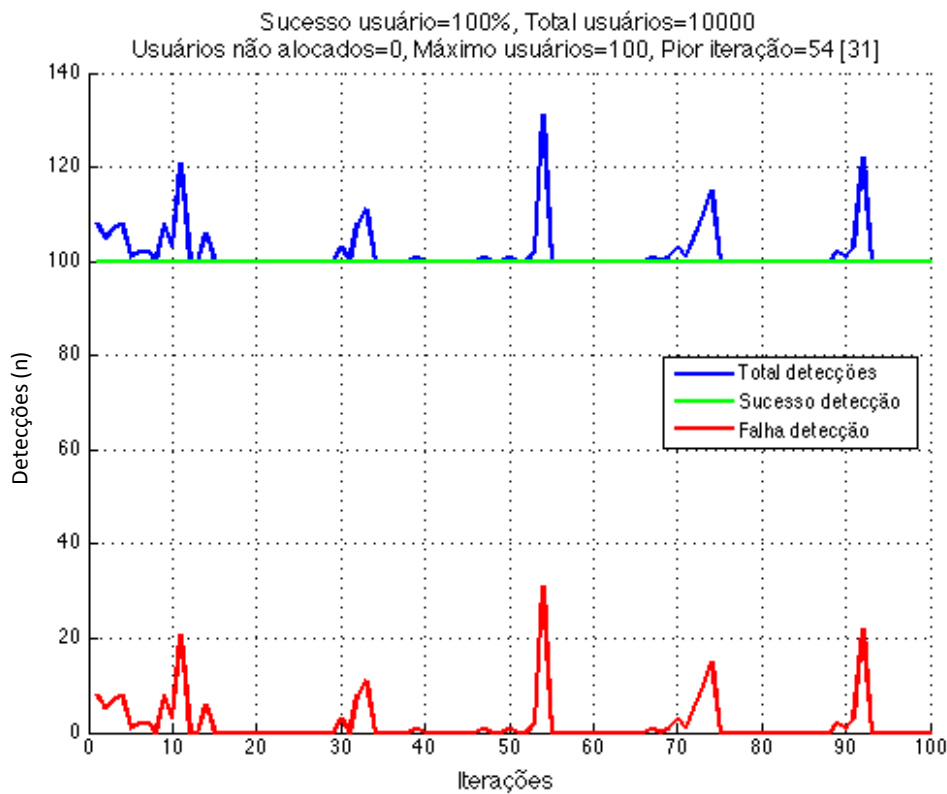
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Na Figura G.1c os 100 usuários foram alocados em todas iterações, conforme pode ser constatado pela linha verde. A iteração que apresentou maior falha de detecção (vermelho) foi a 54, com 31 falhas de detecção. Quando ocorre uma falha de detecção, uma nova detecção tem de ser realizada para encontrar outro canal livre. Isso explica os picos azuis e vermelhos coincidirem.

Figura G.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de pequena escala.

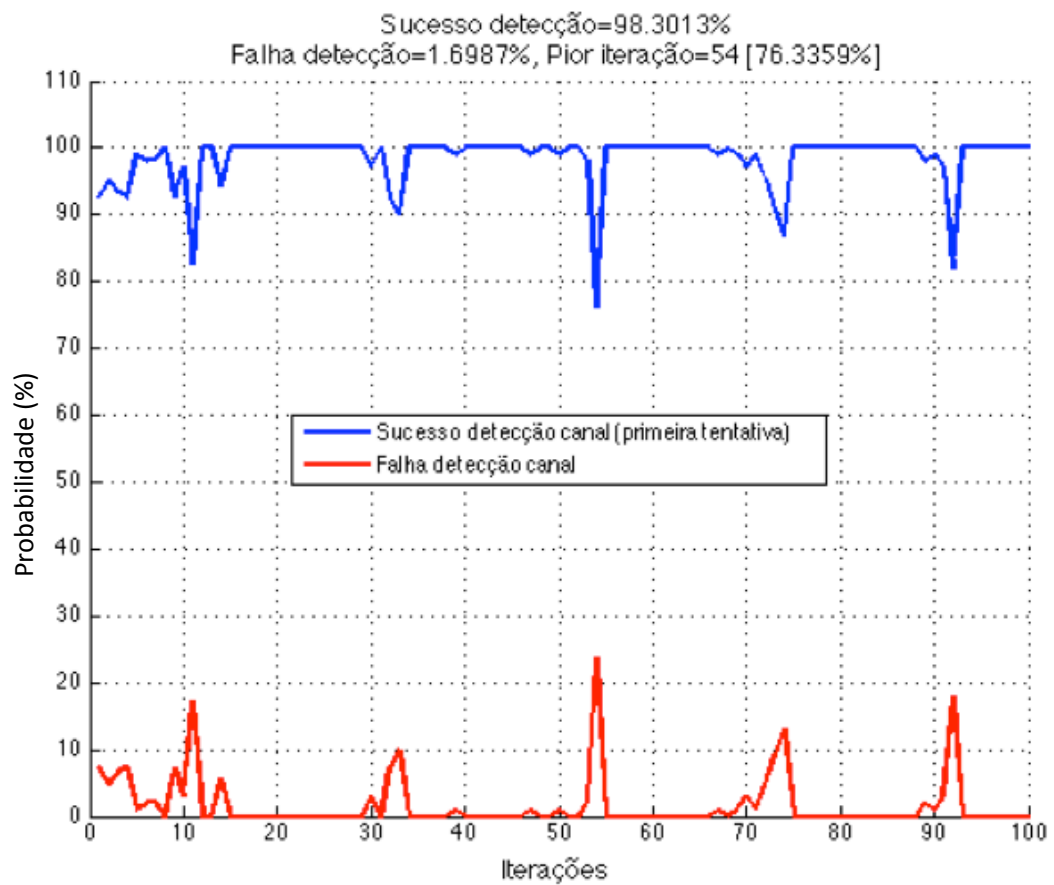
(c) Contadores de acesso do usuário.



Na Figura G.1d, a pior probabilidade de sucesso de detecção ocorreu na iteração 54, com 76,34% de sucesso de detecção na primeira tentativa. Quando a probabilidade de sucesso de detecção (azul) atinge 100%, significa que o acesso ao canal foi bem sucedido na primeira tentativa. Nesse caso, a falha de detecção (vermelho) tem de ser zero.

Figura G.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de pequena escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

Cenário 2

Neste cenário a base de dados está ativa, porém os sucessos e falhas não são utilizados para atualização das estatísticas dos canais. A Tabela G.2 mostra os parâmetros utilizados e os resultados obtidos para uma pequena escala. A Figura G.2 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela G.2 - Parâmetros e resultados do Cenário 2 em situação de pequena escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 100 | fixo | 100 | DB | não | 760 | 0 | desligado |

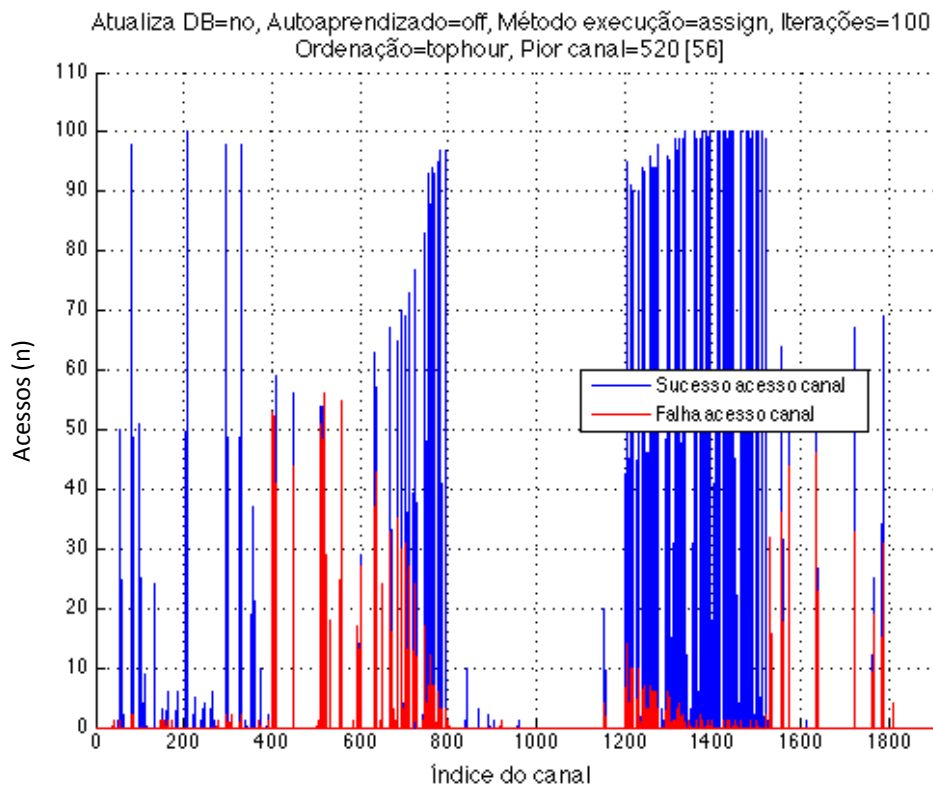
(b) Resultados.

| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 86,71 | 10000 | 0 | 100 | 87,35 | 12,65 |

Na Figura G.2 nota-se que, como não há atualização da base de dados, algumas falhas persistem em determinadas faixas (vermelho).

Figura G.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de pequena escala.

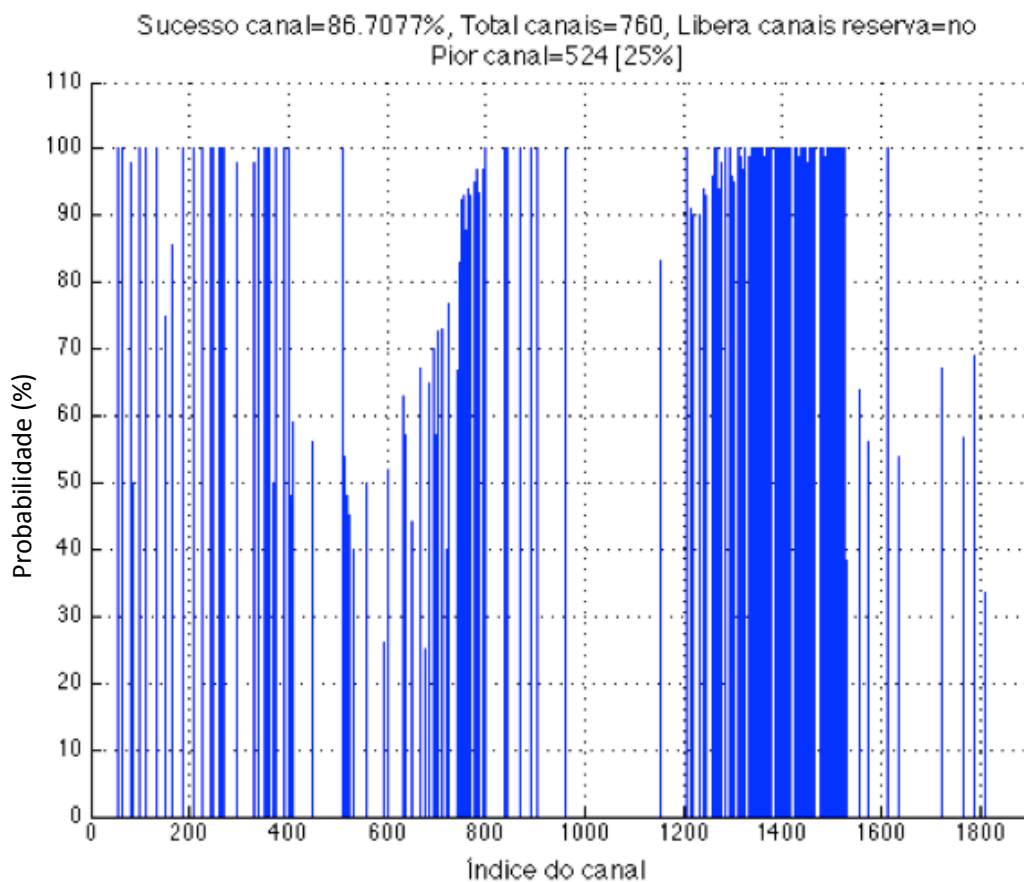
(a) Contadores de acesso aos canais.



Na Figura G.2b, nota-se que os canais com pior probabilidade de sucesso coincidem com as falhas indicados na Figura G.2a.

Figura G.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de pequena escala.

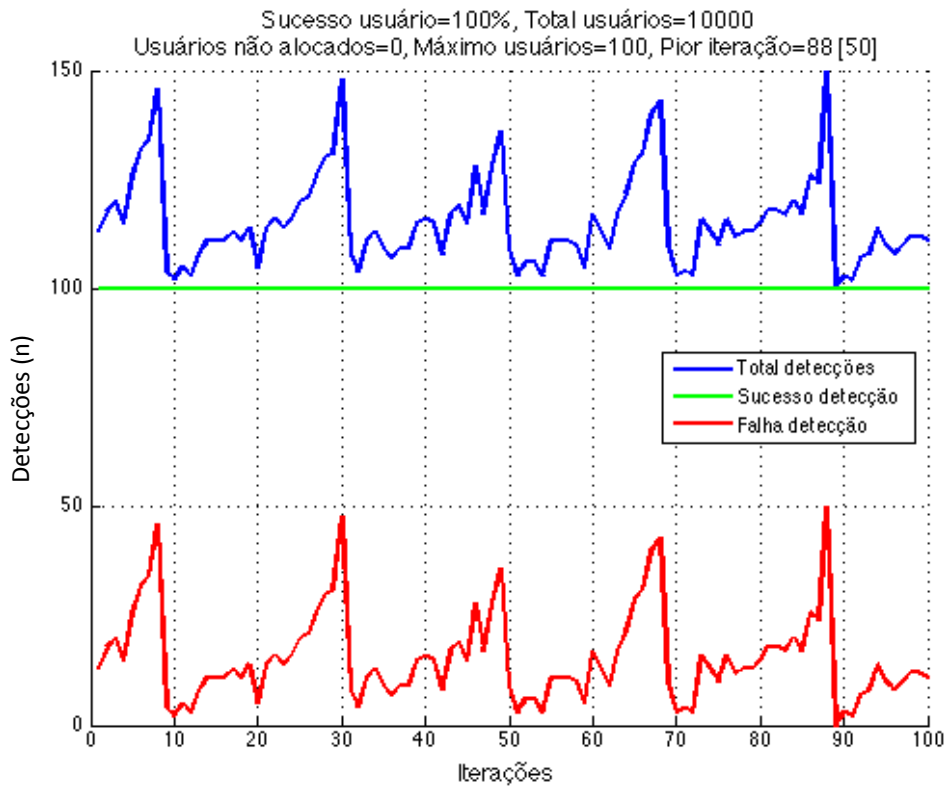
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



A Figura G.2c mostra que, apesar de uma quantidade de falhas maior que o Cenário 1 (Figura G.1c), todos usuários foram alocados (verde).

Figura G.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de pequena escala.

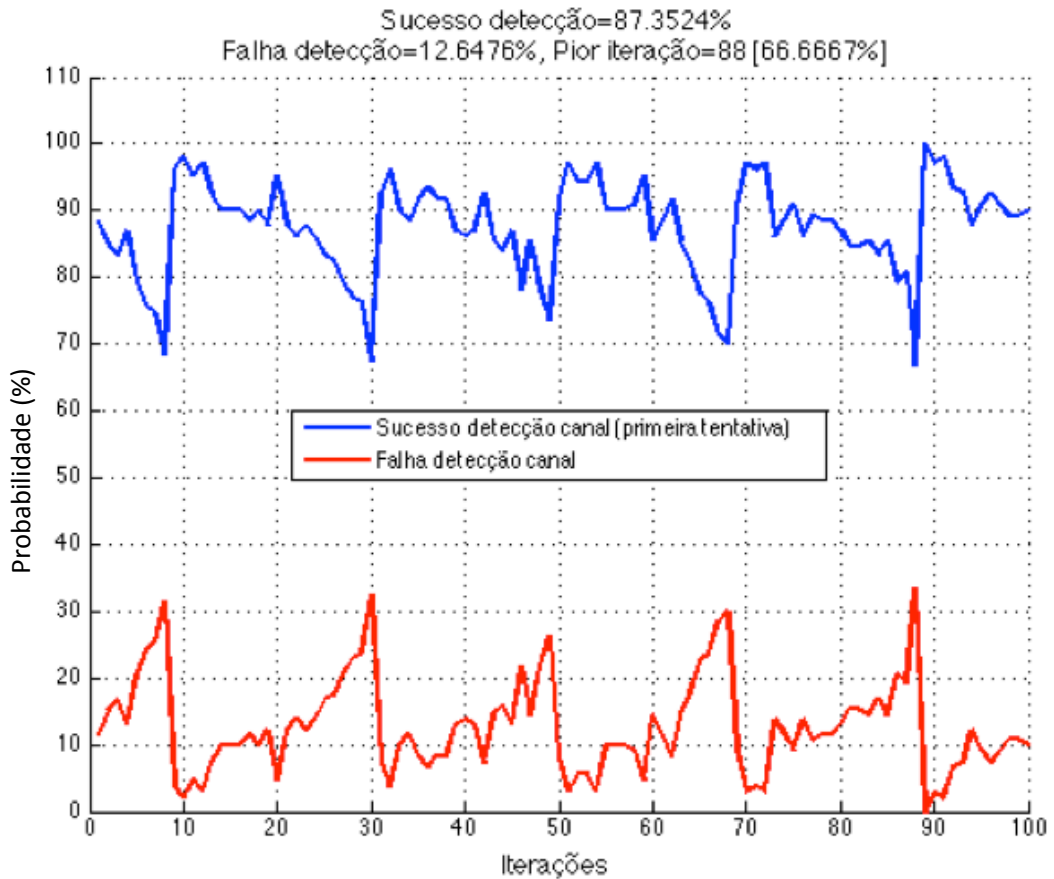
(c) Contadores de acesso do usuário.



A Figura G.2d mostra que a probabilidade de sucesso de detecção (azul), caiu em relação Cenário 1 (Figura G.1d), ficando em 87,35%.

Figura G.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de pequena escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

Cenário 3

A Tabela G.3 mostra os parâmetros de configuração utilizados e os resultados obtidos. A Figura G.3 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela G.3 - Parâmetros e resultados do Cenário 3 em situação de pequena escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|------------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 100 | fixo | 100 | sequencial | n/a | 760 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

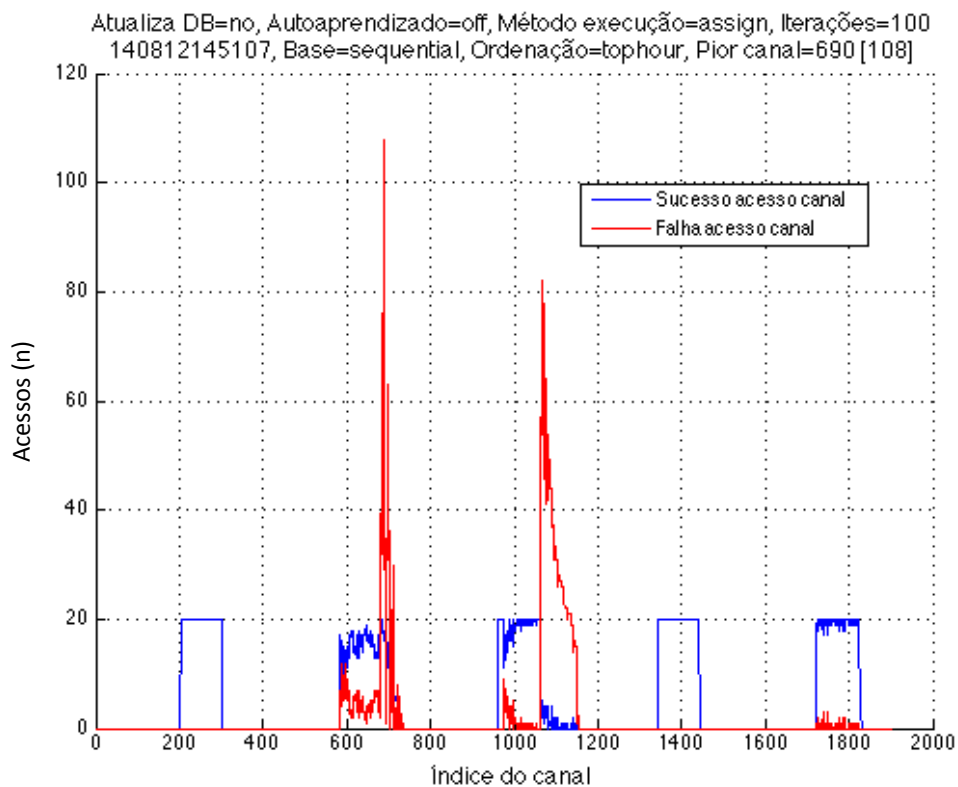
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 68,35 | 10000 | 0 | 100 | 82,1 | 17,9 |

Fonte: o autor.

A Figura G.3a mostra picos de falhas de acesso (vermelho) superiores a 80, nas faixas mais congestionadas. Quando o acesso ocorre em faixas mais desocupadas, o sucesso (azul) supera as falhas (vermelho).

Figura G.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de pequena escala.

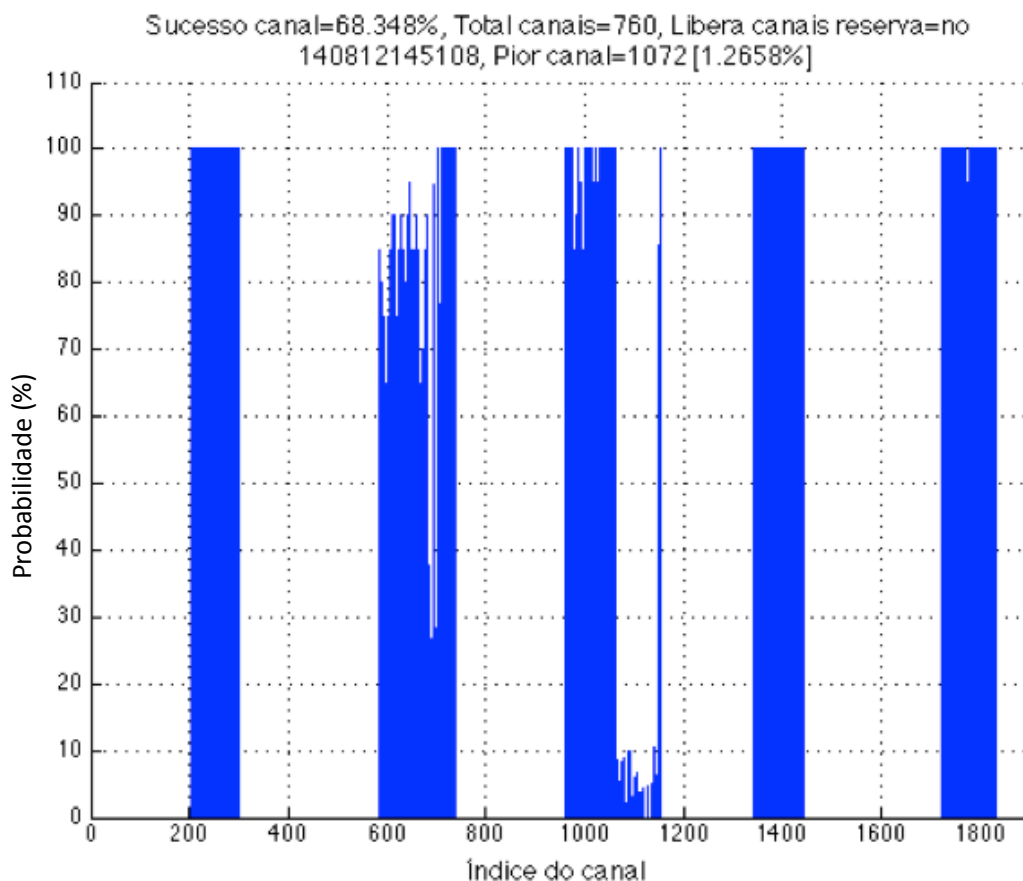
(a) Contadores de acesso aos canais.



Pela Figura G.3b observa-se que alguns canais em faixas mais congestionadas, como a DCS 1800 DL, por exemplo, obtiveram boa probabilidade de sucesso. No entanto, o desempenho global ficou ruim se comparado com outros cenários, atingindo apenas 68,35%.

Figura G.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de pequena escala.

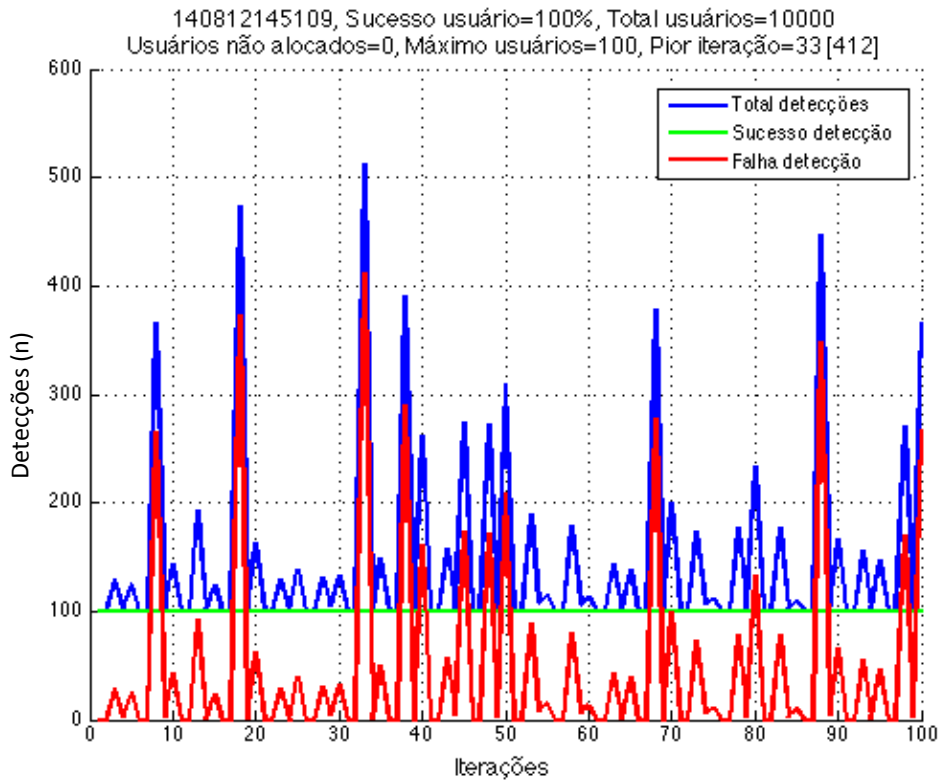
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Pela Figura G.3c é possível verificar um aumento no número de detecções (azul), se comparado com as simulações anteriores, em função do aumento no número de falhas (vermelho). Ainda assim, todos usuários foram alocados (verde).

Figura G.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de pequena escala.

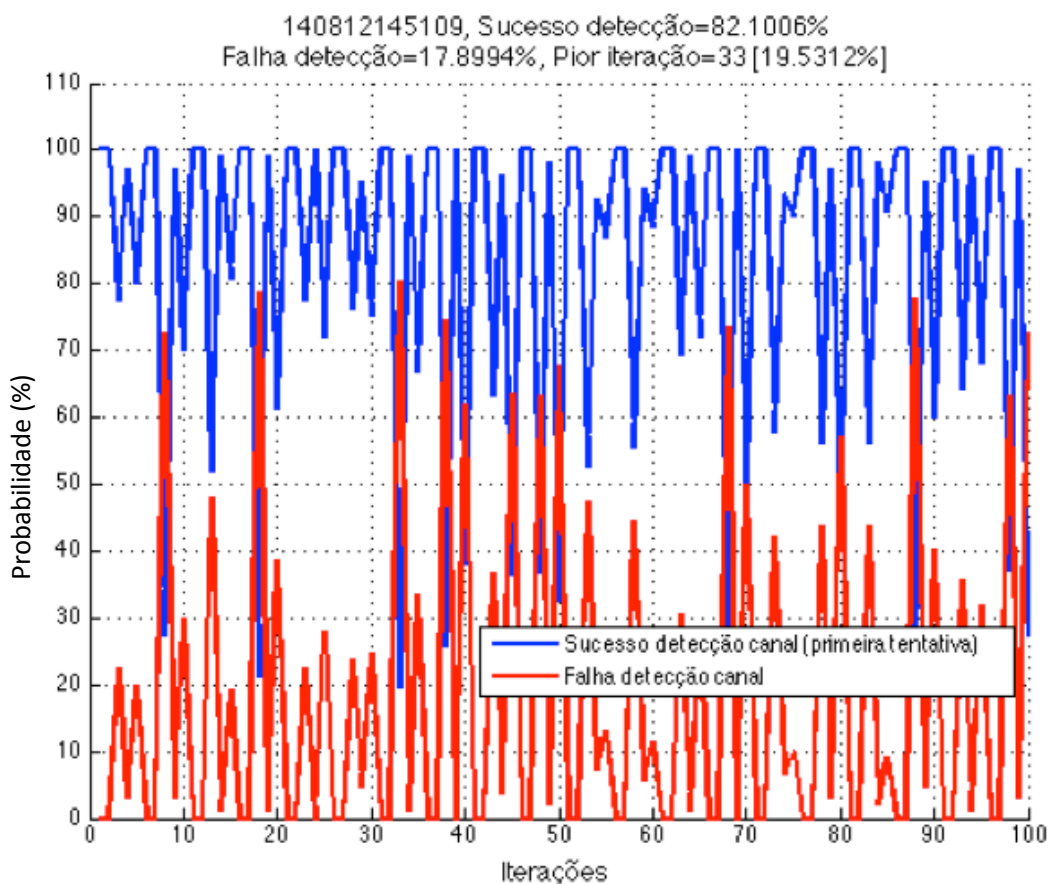
(c) Contadores de acesso do usuário.



Chama a atenção na Figura G.3d a grande quantidade de falhas (vermelho), com média de 17,9%, o que acaba causando uma queda no sucesso de detecção que ficou em 82,1%.

Figura G.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de pequena escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

Cenário 4

A Tabela G.4 mostra os parâmetros de configuração utilizados e os resultados obtidos para o Cenário 4, em situação de pequena escala. A Figura G.4 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela G.4 - Parâmetros e resultados do Cenário 4 em situação de pequena escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|-----------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 100 | fixo | 100 | randômico | n/a | 760 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

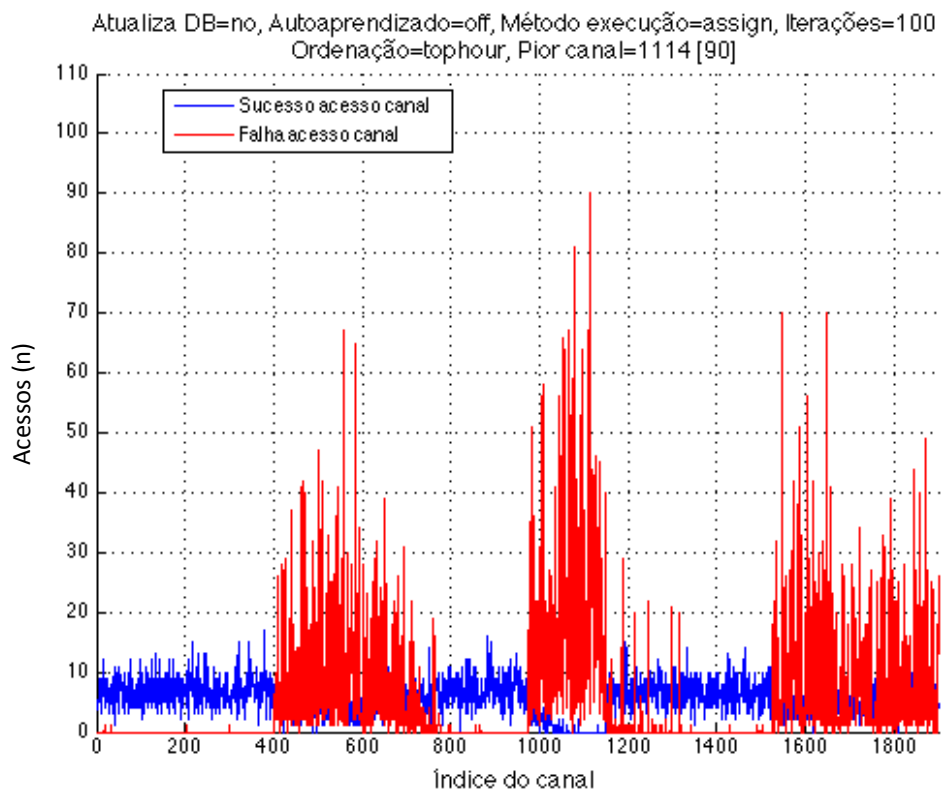
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 49,29 | 10000 | 0 | 100 | 55,25 | 44,75 |

Fonte: o autor.

Na Figura G.4a nota-se uma grande quantidade de acessos e falhas (vermelho) nas faixas mais ocupadas. Quando o mesmo ocorre em bandas menos desocupadas, o sucesso (azul) supera as falhas (vermelho).

Figura G.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de pequena escala.

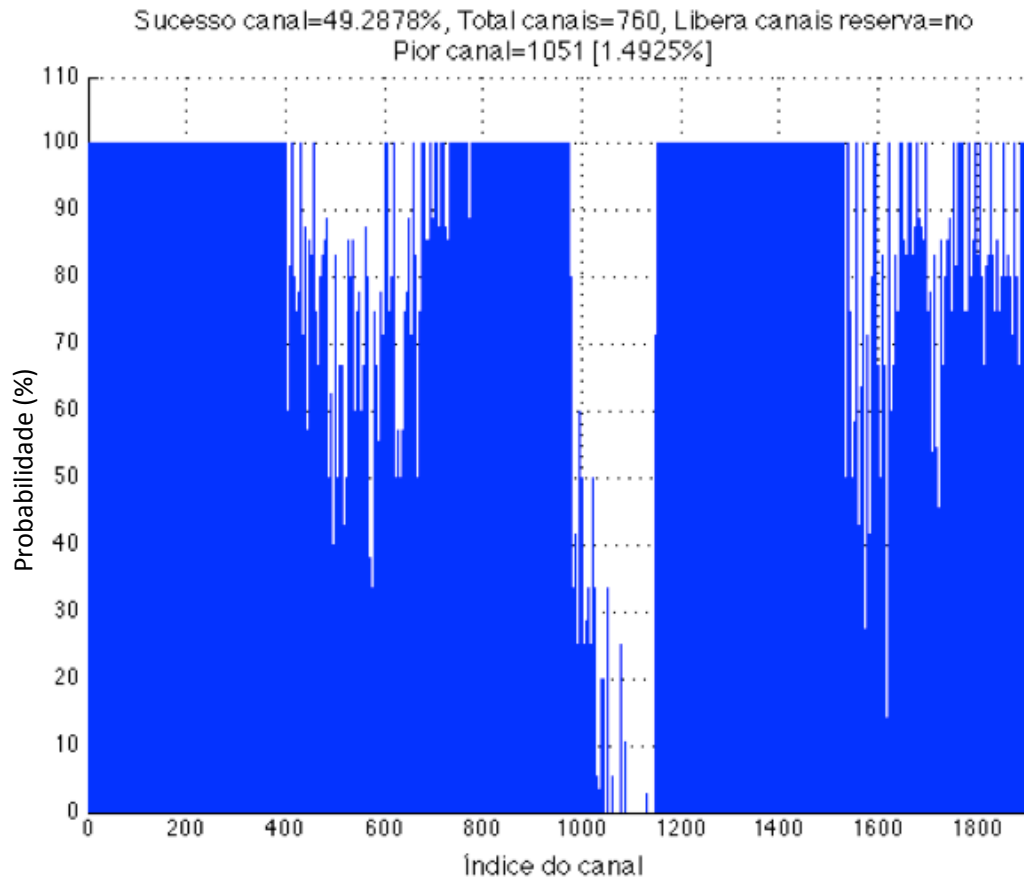
(a) Contadores de acesso aos canais.



A Figura G.4b confirma a pior probabilidade de sucesso dos canais que tiveram maior incidência de falhas na Figura G.4a.

Figura G.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de pequena escala.

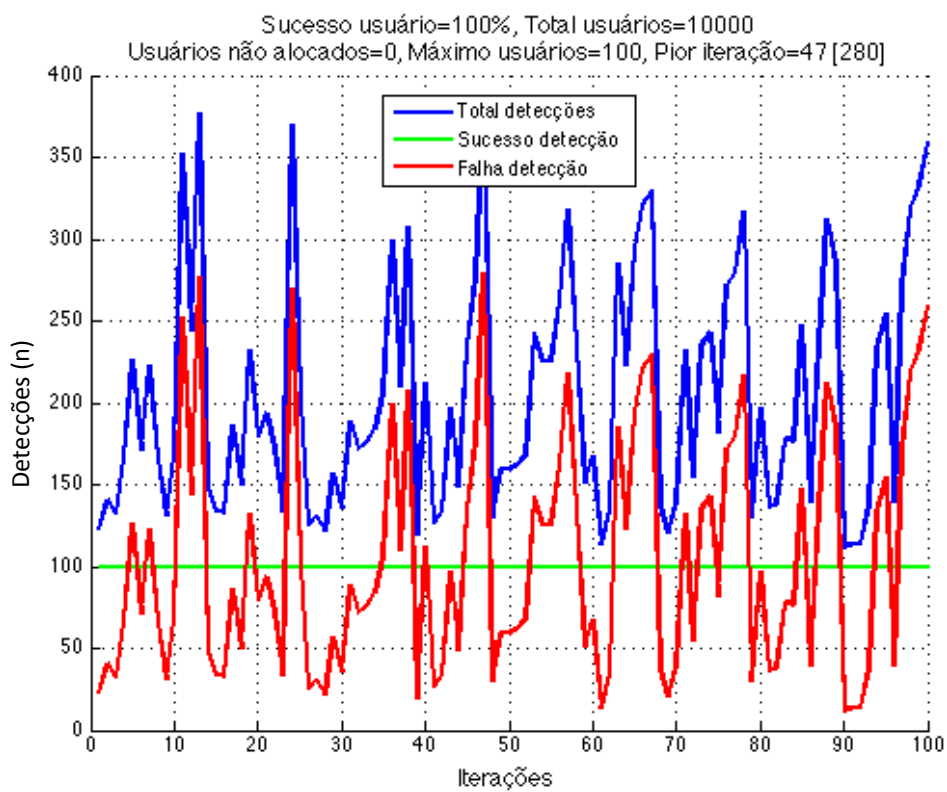
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



A Figura G.4c mostra uma grande ocorrência de falhas (vermelho) e detecções (azul). Ainda assim, todos SUs foram alocados.

Figura G.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de pequena escala.

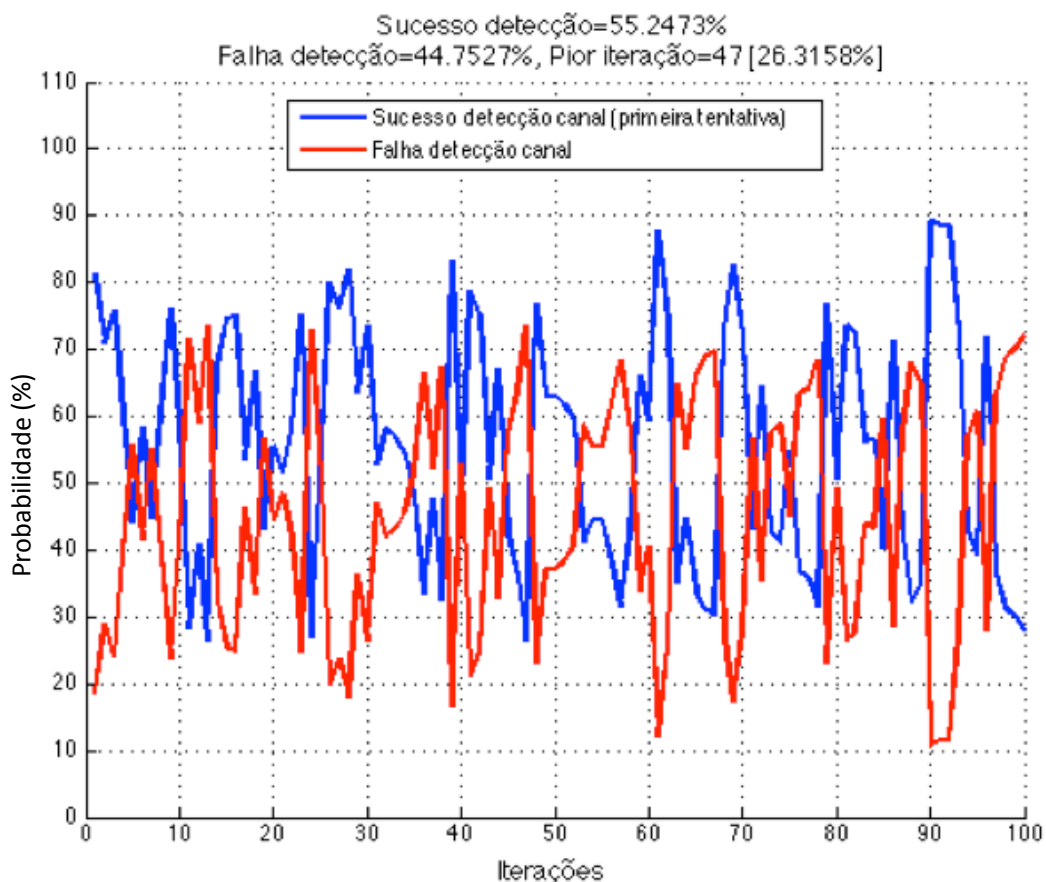
(c) Contadores de acesso do usuário.



Percebe-se na Figura G.4d que o aumento das falhas (vermelho) na Figura G.4c afetou a probabilidade de sucesso de detecção que ficou em apenas 55,25%.

Figura G.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de pequena escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

Cenário 5

A Tabela G.5 mostra os parâmetros de configuração utilizados e os resultados obtidos para o Cenário 5, em situação de pequena escala. A Figura G.5 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela G.5 - Parâmetros e resultados do Cenário 5 em situação de pequena escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 100 | fixo | 100 | DB | sim | 760 | 0 | ligado |

(b) Resultados.

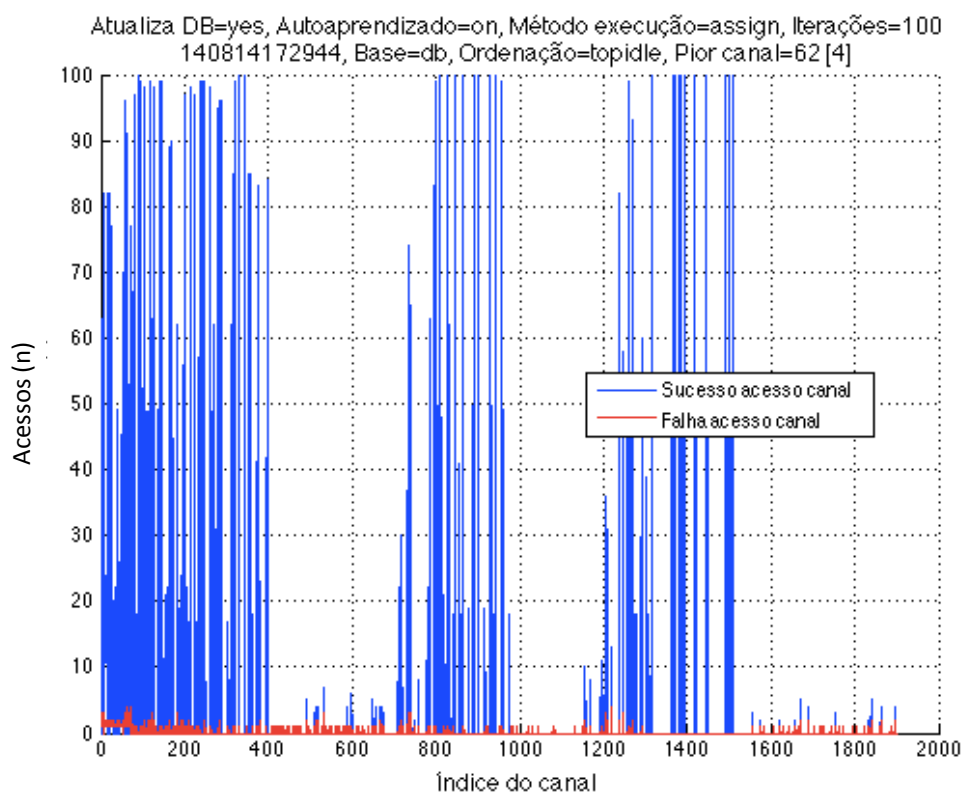
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 96,55 | 10000 | 0 | 100 | 97,11 | 2,89 |

Fonte: o autor.

A Figura G.5a mostra baixa incidência de falhas em todo o espectro. Nas faixas com maior quantidade de falhas (vermelho), o número de acessos (azul) é reduzido em função do caráter adaptativo da base de dados.

Figura G.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de pequena escala.

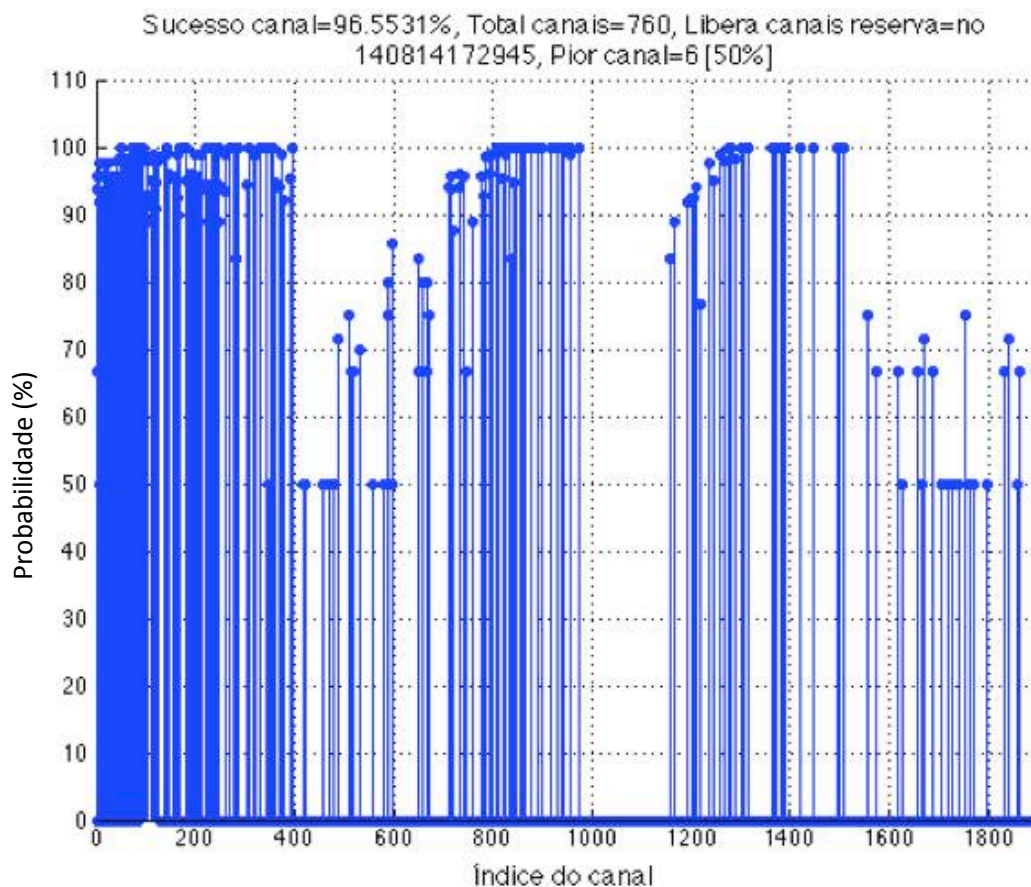
(a) Contadores de acesso aos canais.



A Figura G.5b confirma que as faixas com maior sucesso estão nas bandas menos ocupadas.

Figura G.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de pequena escala.

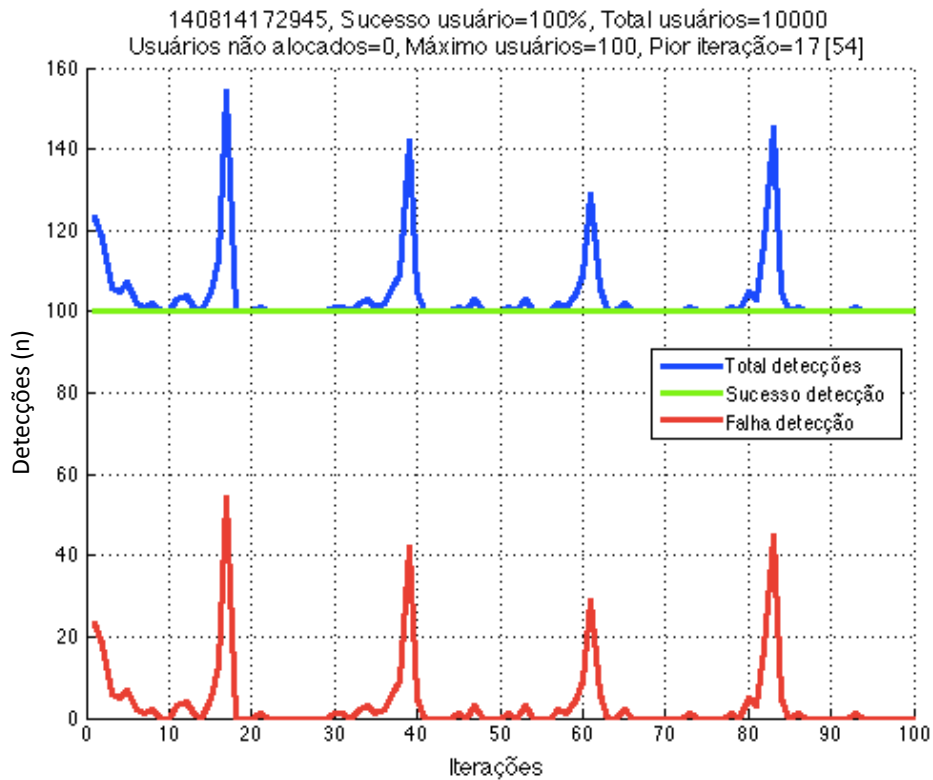
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



A Figura G.5c mostra uma queda das falhas (vermelho) nas primeiras 10 iterações, que é o tempo necessário para construção da lista de canais. Apesar de alguns picos ao longo da simulação, o número de falhas se manteve abaixo de 60 na maior parte do tempo.

Figura G.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de pequena escala.

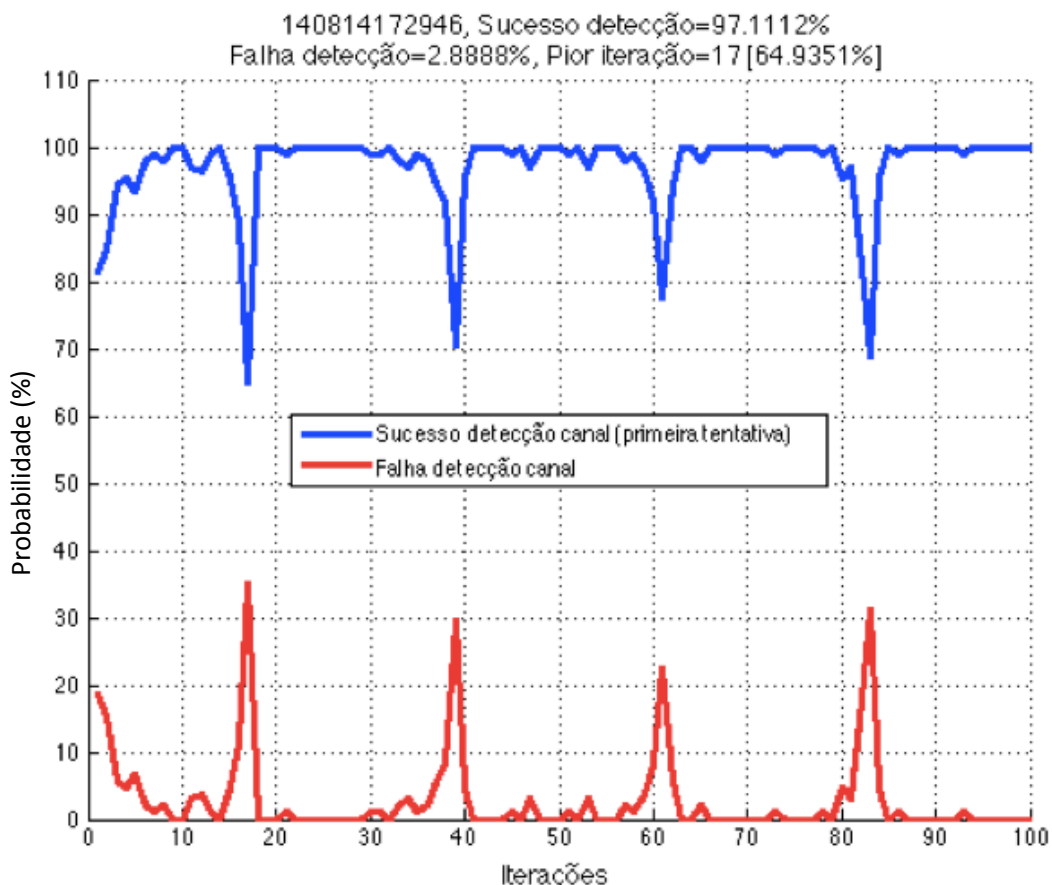
(c) Contadores de acesso do usuário.



A Figura G.5d confirma o comportamento apresentado na Figura G.5c. O sucesso de detecção médio apresentou resultado muito bom, ficando em 97,11%.

Figura G.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de pequena escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

Cenários de 1 a 5: Análise dos Resultados

A Tabela G.6 mostra um resumo dos resultados obtidos para os cinco cenários considerando uma pequena escala.

Tabela G.6 - Tabela de resultados dos cenários de 1 a 5 em situação de pequena escala.

| Cenário | Sucesso canal (%) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|---------|-------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 1 | 98,11 | 100 | 98,3 | 1,7 |
| 2 | 86,71 | 100 | 87,36 | 12,65 |
| 3 | 59,75 | 100 | 74,21 | 25,79 |
| 4 | 49,29 | 100 | 55,25 | 44,75 |
| 5 | 96,55 | 100 | 97,11 | 2,89 |

Analisando os dados Tabela G.6, é possível confirmar que o método que utiliza a base de dados adaptativa (Cenário 1), é o que apresenta melhor resultado em praticamente todos os indicadores.

No Cenário 2, onde não há atualização da base de dados, fica perceptível a queda nos indicadores *Sucesso canal* e *Sucesso detecção*, em relação ao Cenário 1. Já o indicador *Falha detecção* aumenta se comparado ao Cenário 1. Essa queda ocorre porque os canais que apresentam falha continuam sendo usados para atribuição, pois sua posição na fila de canais não se altera.

Os cenários 3 e 4 são marcados pela grande incidência de falhas de acesso aos canais, demonstrada pelo indicador *Sucesso canal*. Na Figura G.4a, por exemplo, é fácil visualizar a grande quantidade de falhas (vermelho), nas faixas mais congestionadas do espectro (TETRA DL, GSM 900 DL e DCS 1800 DL). Como não há critério na escolha do canal, pois o Cenário 3 utiliza uma busca sequencial, enquanto o Cenário 4 usa uma busca randômica, este tipo de comportamento é esperado. Além disso, como não há base de dados, as informações de falha e acerto não são utilizadas pelo *Spectrum Manager* (SM).

O Cenário 5, onde é usado o modo adaptativo, apresenta indicadores bem próximos do Cenário 1. Entretanto, pode-se observar uma incidência maior de falhas de detecção nas primeiras 10 iterações, para o Cenário 5. Ainda assim, por trabalhar com uma base de dados adaptativa, este cenário apresenta resultados muitos bons, mesmo não tendo conhecimento prévio da estatística dos canais.

O indicador *Sucesso usuário* apresenta 100% em todos os cenários, pois foi utilizada uma quantidade de 100 usuários por iteração. Como o espectro útil possui 760 canais neste cenário, dificilmente um usuário fica sem canal.

Cenário 6

A análise da Tabela G.7b será realizada ao final do Apêndice H, juntamente com o cenário de larga escala e média escala apresentado na Seção 7.7.

A Figura G.6 apresenta os gráficos com o resultado desta simulação. A Tabela G.7a apresenta os parâmetros de configuração utilizados nesta simulação.

Tabela G.7 - Parâmetros e resultados do Cenário 6 em situação de pequena escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 100 | fixo | 100 | DB | sim | 760 | 20 | desligado |

(b) Resultados.

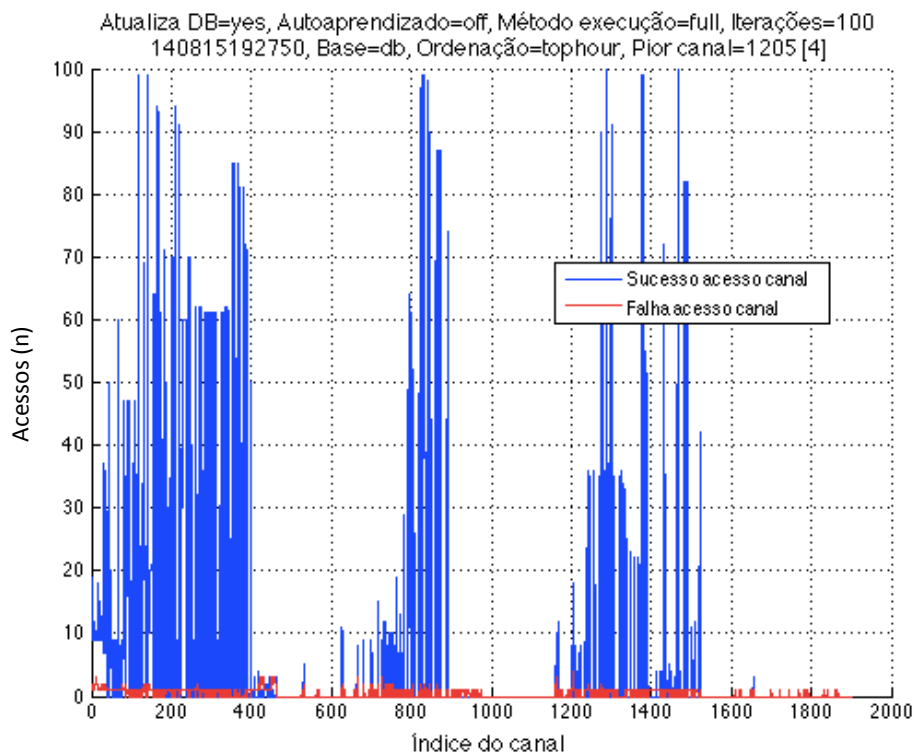
| Sucesso canal (%) | Total SU comum (n) | SU comum não alocado (n) | Sucesso SU comum (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) | Total SU QoS (n) | SU QoS não alocado (n) | Sucesso SU QoS (%) | Sucesso detecção QoS (%) | Falha detecção QoS (%) |
|-------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|
| 94,3 | 8000 | 0 | 100 | 96,57 | 3,43 | 2000 | 265 | 86,75 | 94,7 | 4,81 |

Fonte: o autor.

Na Figura G.6a é possível observar que a utilização dos canais (azul) ficou concentrada nas faixas menos utilizadas do espectro (TETRA UL, GSM 900 UL e DCS 1800 UL). A incidência de falhas (vermelho) utilizando este método é baixa em função da capacidade de aprendizado da base dados. Esse comportamento evita a ocorrência de falhas persistentes.

Figura G.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de pequena escala.

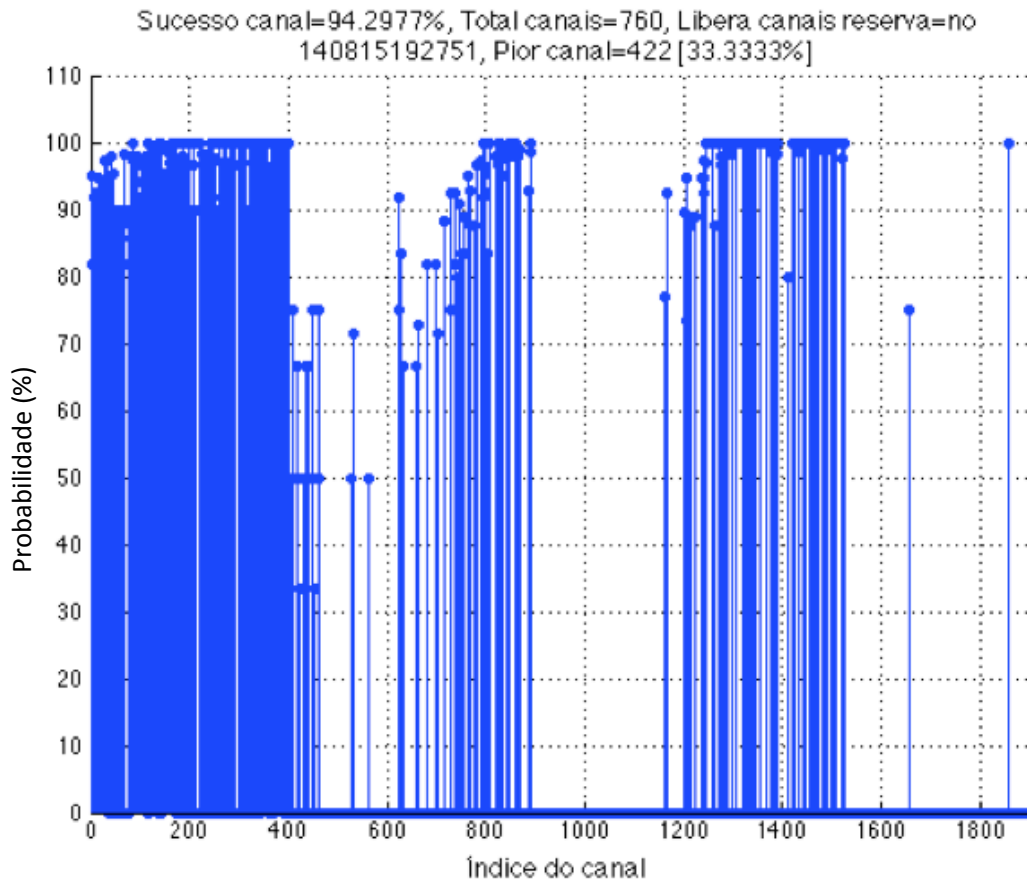
(a) Contadores de acesso aos canais.



Conforme pode ser observado na Figura G.6b, os canais com probabilidades menores estão localizados nas faixas mais congestionadas do espectro.

Figura G.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de pequena escala.

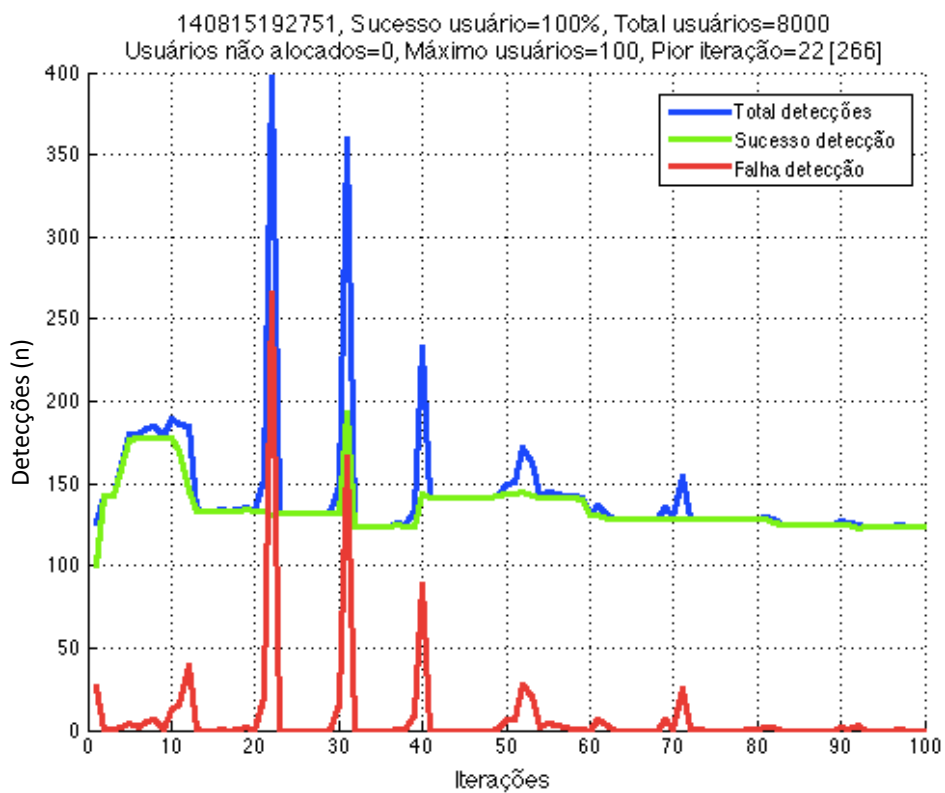
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Na Figura G.6c já é possível observar a presença dos usuários de QoS. Em cada iteração existem 80 usuários comuns e 20 usuários de QoS. Em situações onde não existe falha (vermelho), as curvas verde e azul possuem valores acima de 100, que é o número máximo de SUs. Isto ocorre porque os SUs de QoS alocam mais de um canal para transmissão. Em função disso, precisam fazer mais detecções do que um usuário comum, que numa situação semelhante, faria apenas uma detecção.

Figura G.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de pequena escala.

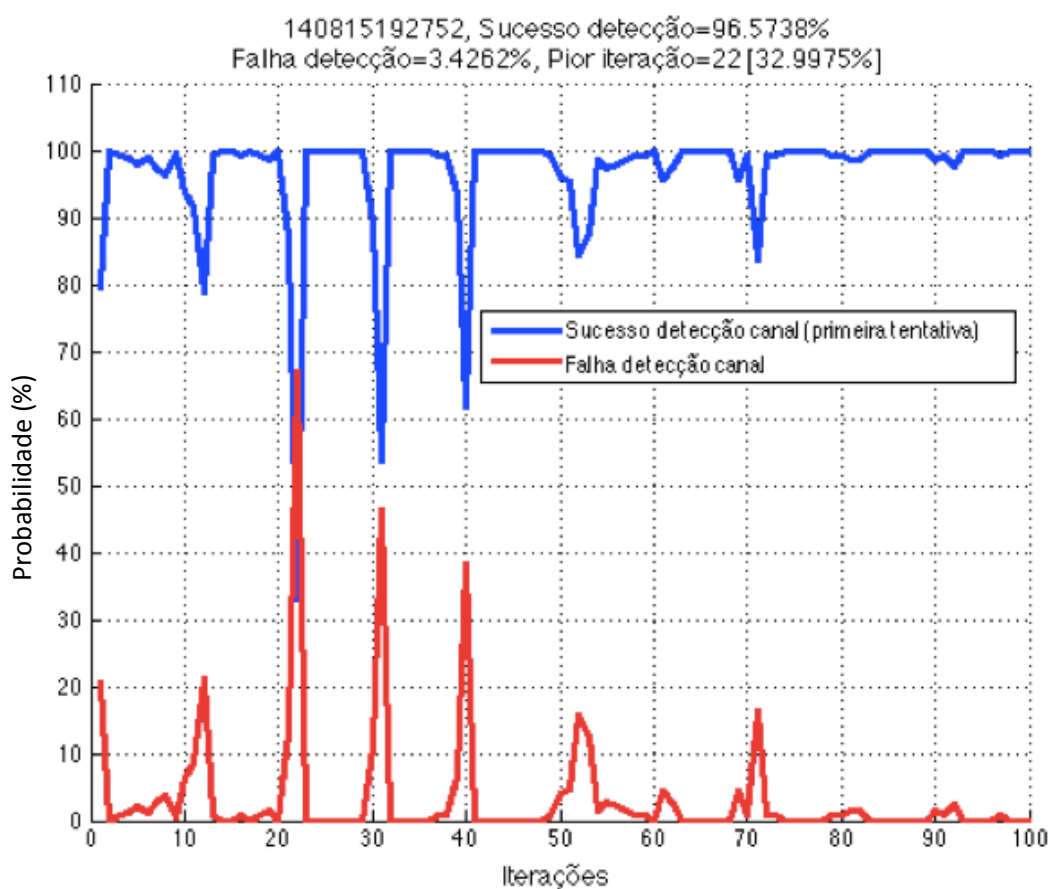
(c) Contadores de acesso do usuário.



Na Figura G.6d é possível perceber alguns picos de falha de detecção, sendo que a pior iteração foi a 22 com 32,3% de falha. O aumento das falhas, em comparação com as simulações sem a presença de SUs de QoS, é esperado em função da alocação para os usuários de QoS ser feita em primeiro lugar e em maior número de canais. Assim, os canais que sobram para os usuários comuns, nem sempre são os com melhor disponibilidade.

Figura G.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de pequena escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.

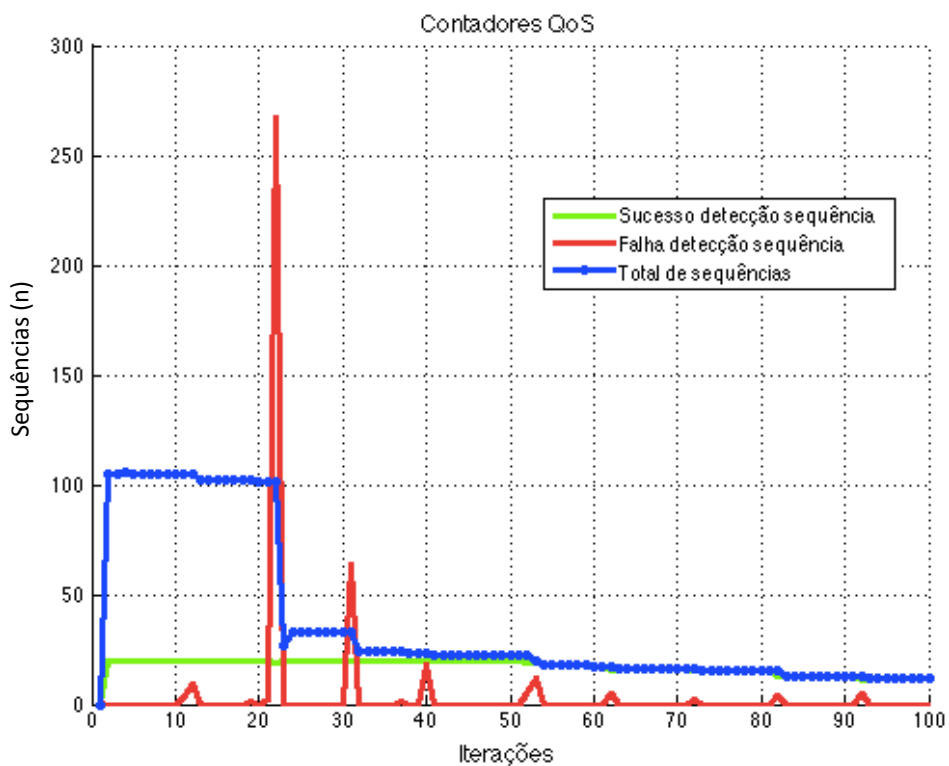


Na Figura G.6e a curva azul indica o número de seqüências identificadas no espectro. Tais seqüências são utilizadas para atendimento dos SUs de QoS. Como pode ser observado, depois da iteração 20 ocorre a diminuição no número de seqüências. Esta diminuição é aceitável devido ao caráter adaptativo da base de dados. Dessa forma, a movimentação dos canais na lista de prioridade da base de dados pode causar a interrupção de algumas seqüências, bem como o surgimento de novas.

A curva verde indica que um usuário conseguiu alocar uma seqüência de canais. A vermelha representa uma falha na alocação do SU de QoS.

Figura G.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de pequena escala.

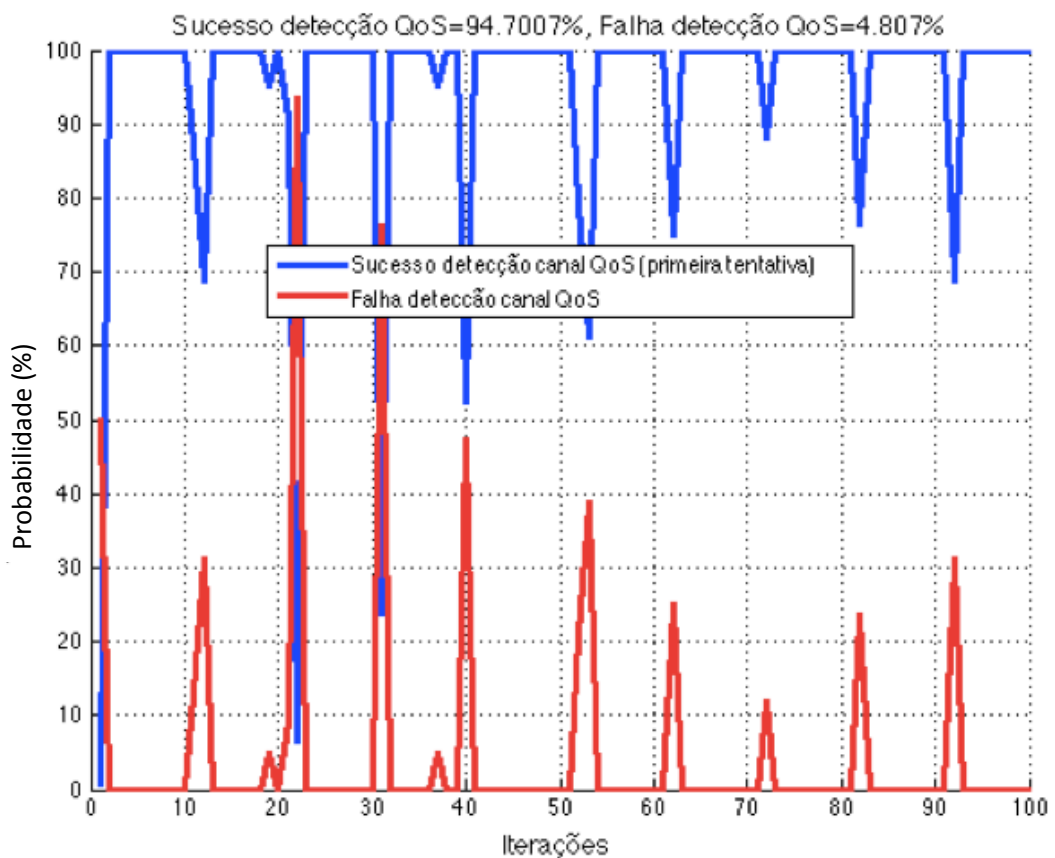
(e) Contadores de QoS.



Na Figura G.6f a curva azul representa a probabilidade de sucesso na alocação de seqüências de canais. A probabilidade de falha de detecção de seqüências (vermelho) é maior do que a Figura 6.1d, por exemplo, devido ao maior número de detecções que o SU de QoS é obrigado a realizar, em função de estar alocando mais de um canal. Este tipo de situação não ocorre nas simulações de SUs comuns, onde o usuário faz a detecção somente até encontrar um canal livre.

Figura G.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de pequena escala.

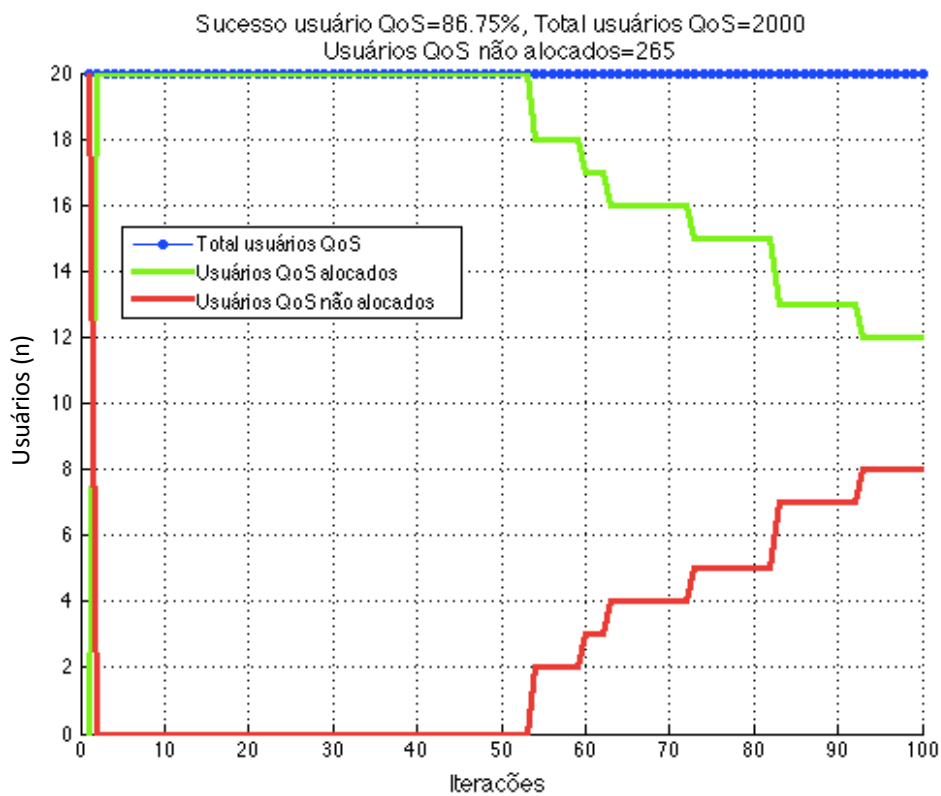
(f) Probabilidade de sucesso na detecção de canal de QoS.



Na Figura G.6g é possível observar que quando ocorre uma diminuição no número de seqüências de canais a partir da iteração 50, o número de usuários de QoS utilizando a rede também cai (verde). A redução do número de seqüências pode ser observada na Figura G.6e (azul). Em função da disponibilidade de seqüências ser de difícil previsão, é natural que a probabilidade de alocação de usuários de QoS seja inferior a de SUs comuns. Como pode-se observar nesta simulação, o indicador *Sucesso usuário* ficou em 100% e o *Sucesso usuário QoS* atingiu 86,75%.

Figura G.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de pequena escala.

(g) Usuários de QoS.



Fonte: o autor.

Apêndice H - Análise Larga Escala

Cenário 1

A Tabela H.1 apresenta os parâmetros de configuração e resultados para uma simulação de larga escala. Nesse caso utilizou-se 512 usuários acessando uma rede com 570 canais disponíveis. A Figura H.1 apresenta os gráficos para esta simulação.

Tabela H.1 - Parâmetros e resultados do Cenário 1 em situação de larga escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | fixo | 100 | DB | sim | 570 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

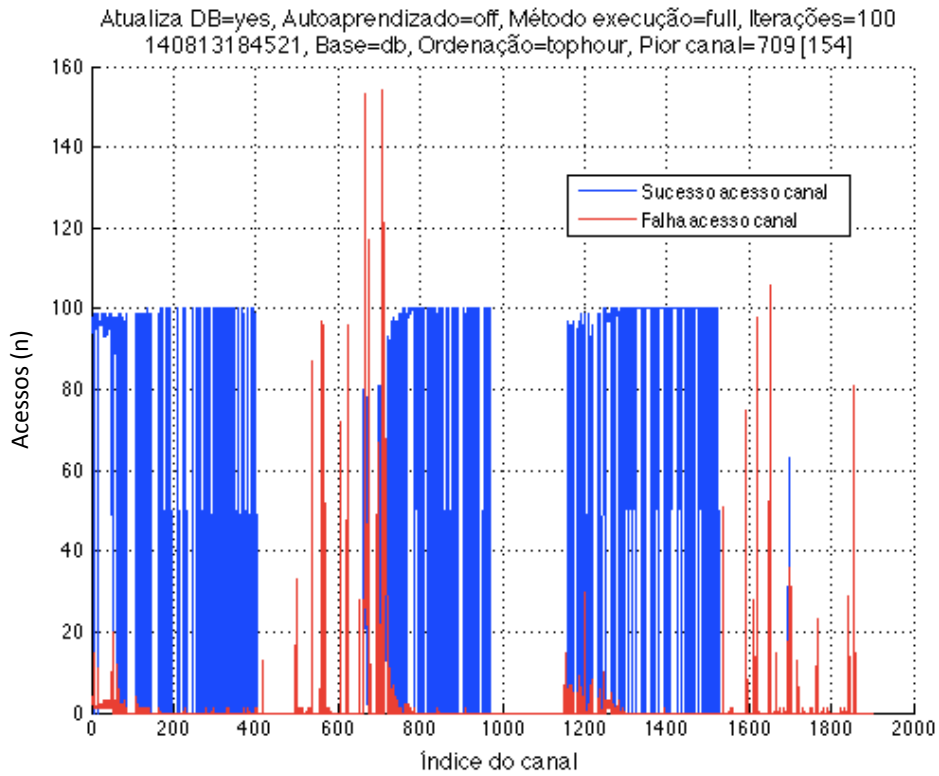
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 93,02 | 51200 | 0 | 100 | 93,68 | 6,32 |

Fonte: o autor.

Pela Figura H.1a é possível verificar que, devido à grande quantidade de SUs, alguns acessos são realizados nas faixas mais ocupadas do espectro.

Figura H.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de larga escala.

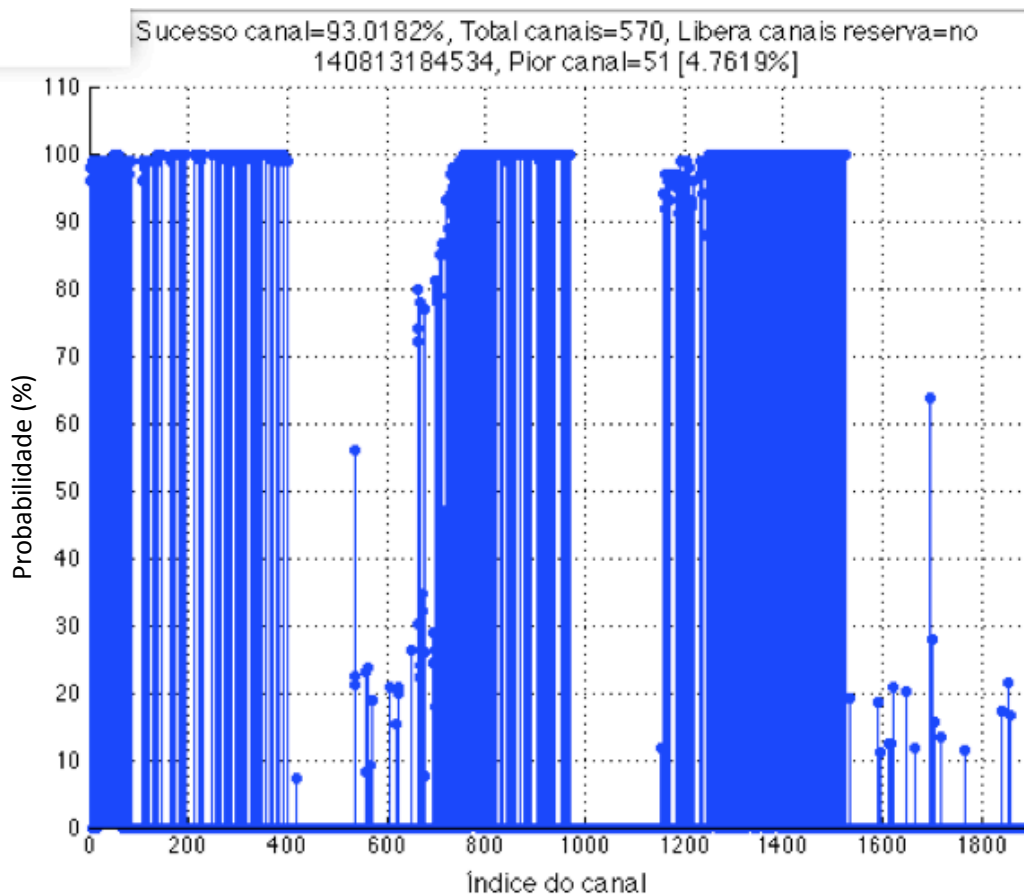
(a) Contadores de acesso aos canais.



Na Figura H.1b observa-se a baixa probabilidade de sucesso dos canais pertencentes às faixas mais ocupadas do espectro.

Figura H.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de larga escala.

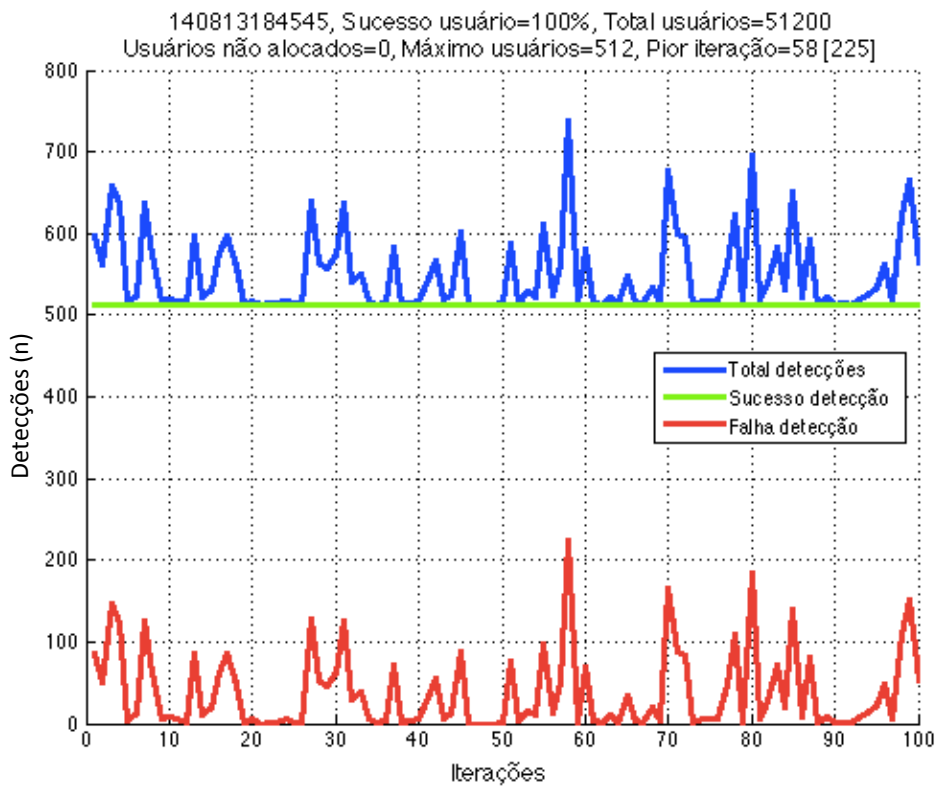
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Apesar do aumento da falha (vermelho) em relação ao cenário de pequena escala (Figura G1.c), a Figura H.1c mostra que todos os usuários foram alocados (verde).

Figura H.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de larga escala.

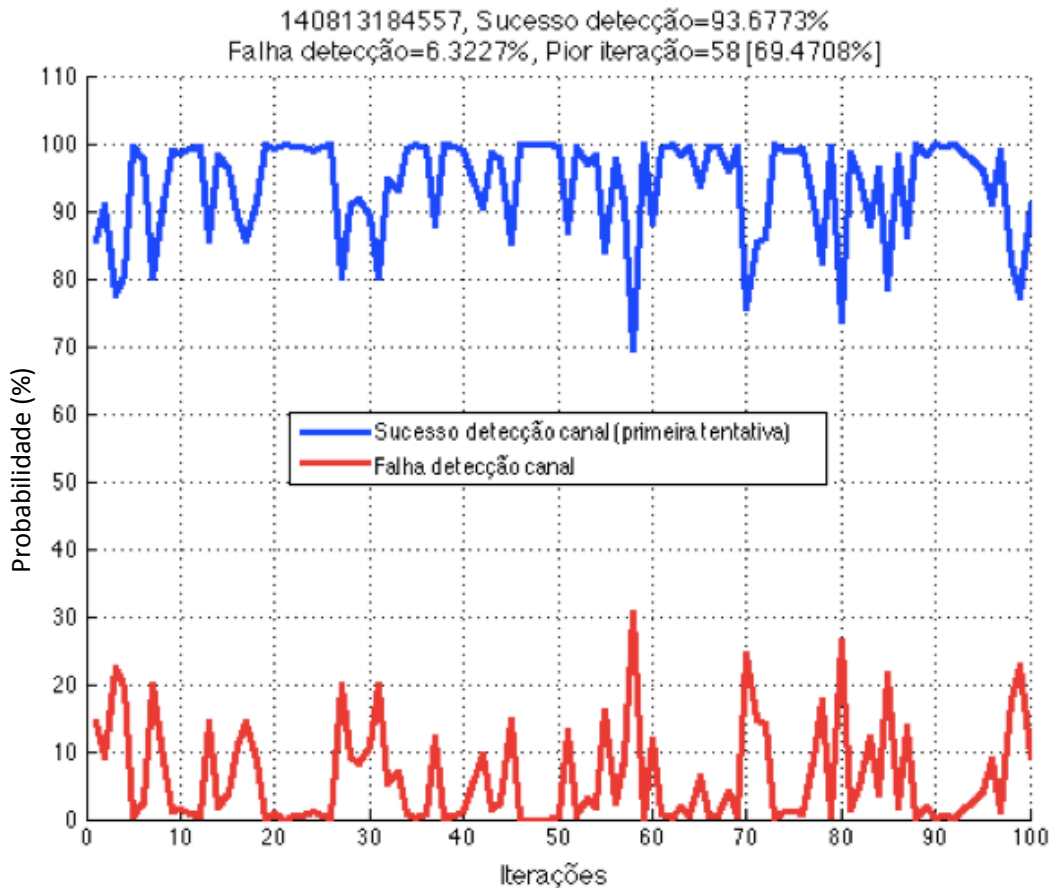
(c) Contadores de acesso do usuário.



Pela Figura H.1d observa-se que o aumento da falha causa uma queda no sucesso de detecção (azul) em relação à Figura G1.d, que considera um cenário de pequena escala. Neste cenário o sucesso de detecção foi 93,67%, sendo que na simulação da Figura G.1d o mesmo ficou em 98,3%.

Figura H.1 - Resultados da simulação do Cenário 1 em situação de larga escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

Cenário 2

A Tabela H.2 mostra os parâmetros utilizados e os resultados obtidos para uma simulação de larga escala. A Figura H.2 apresenta os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela H.2 - Parâmetros e resultados do Cenário 2 em situação de larga escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | fixo | 100 | DB | não | 570 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

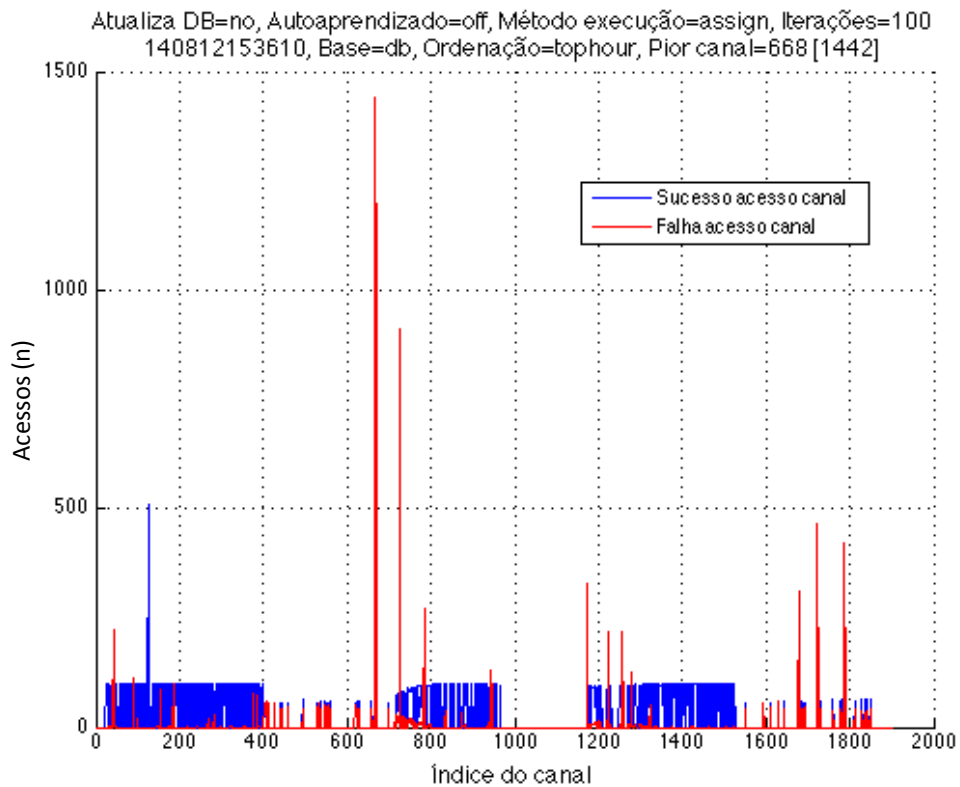
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 82,01 | 51200 | 0 | 100 | 85,07 | 14,93 |

Fonte: o autor.

A Figura H.2a mostra grande quantidade de acesso com falhas (vermelho) em faixas congestionadas, em função da base de dados não estar sendo atualizada.

Figura H.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de larga escala.

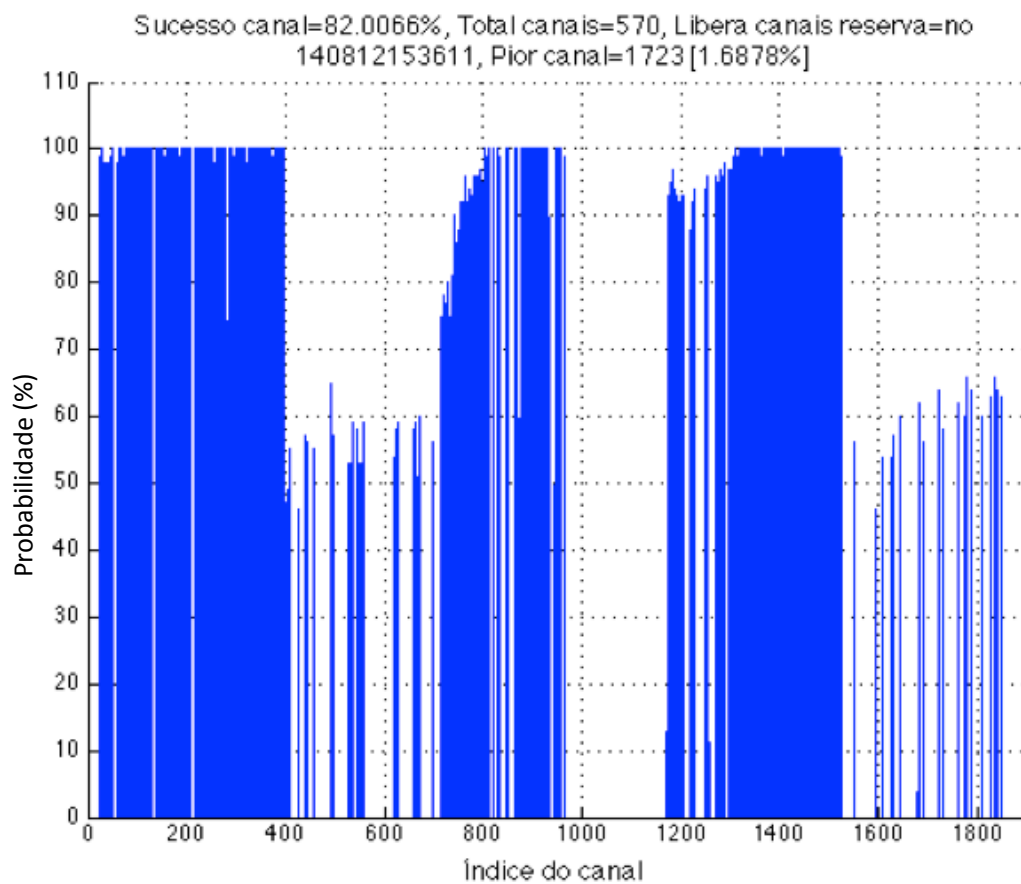
(a) Contadores de acesso aos canais.



A Figura H.2b mostra a baixa probabilidade de sucesso dos canais com maior quantidade de falhas.

Figura H.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de larga escala.

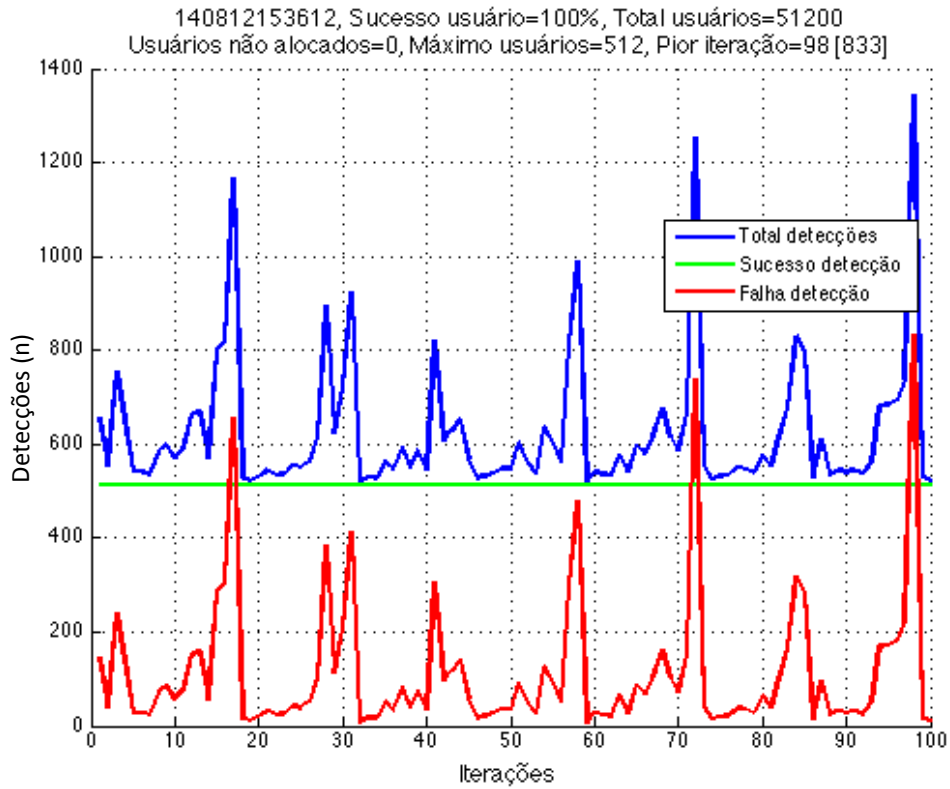
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Apesar do aumento das falhas neste cenário em relação à Figura H.1c, a Figura H.2c mostra que todos SUs foram alocados (verde).

Figura H.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de larga escala.

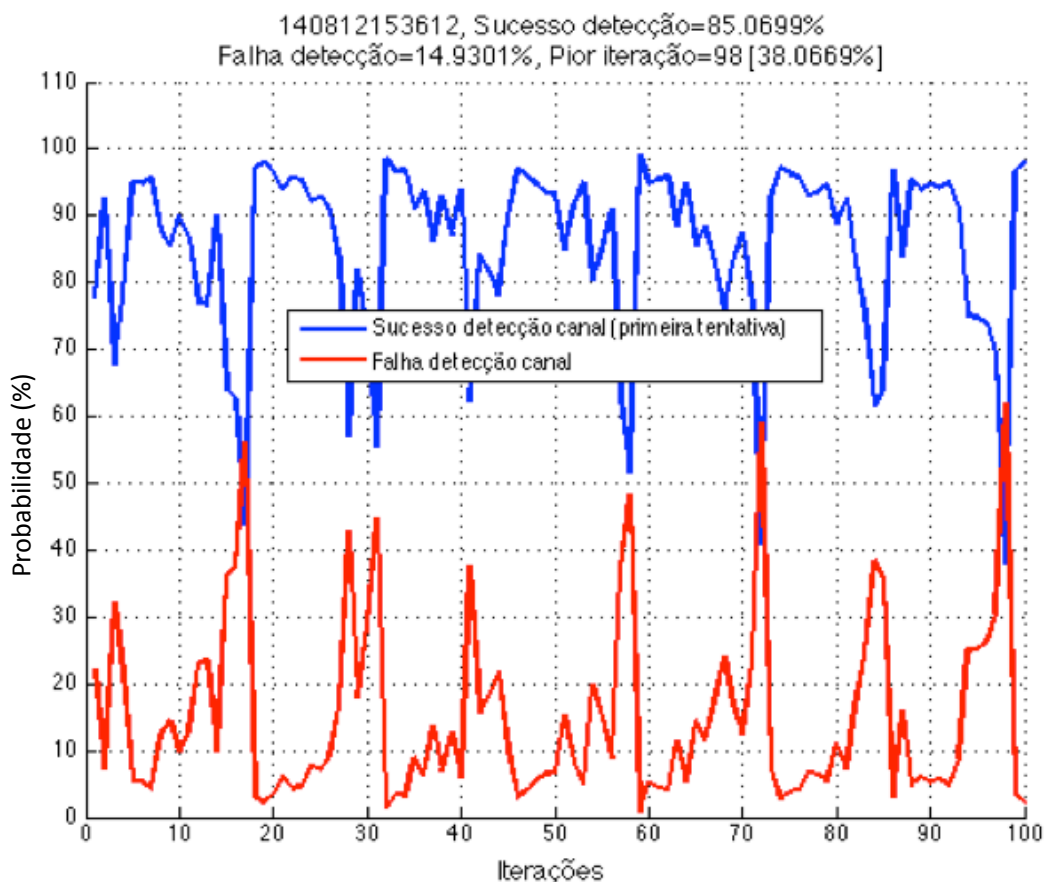
(c) Contadores de acesso do usuário.



Na Figura H.2d é possível verificar que os picos de falhas (vermelho) afetaram a probabilidade de sucesso de detecção que ficou em 85,06%.

Figura H.2 - Resultados da simulação do Cenário 2 em situação de larga escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

Cenário 3

A Tabela H.3 mostra os parâmetros de configuração utilizados e os resultados obtidos para o Cenário 3, com larga escala. A Figura H.3 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela H.3 - Parâmetros e resultados do Cenário 3 em situação de larga escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|------------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | fixo | 100 | sequencial | n/a | 570 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

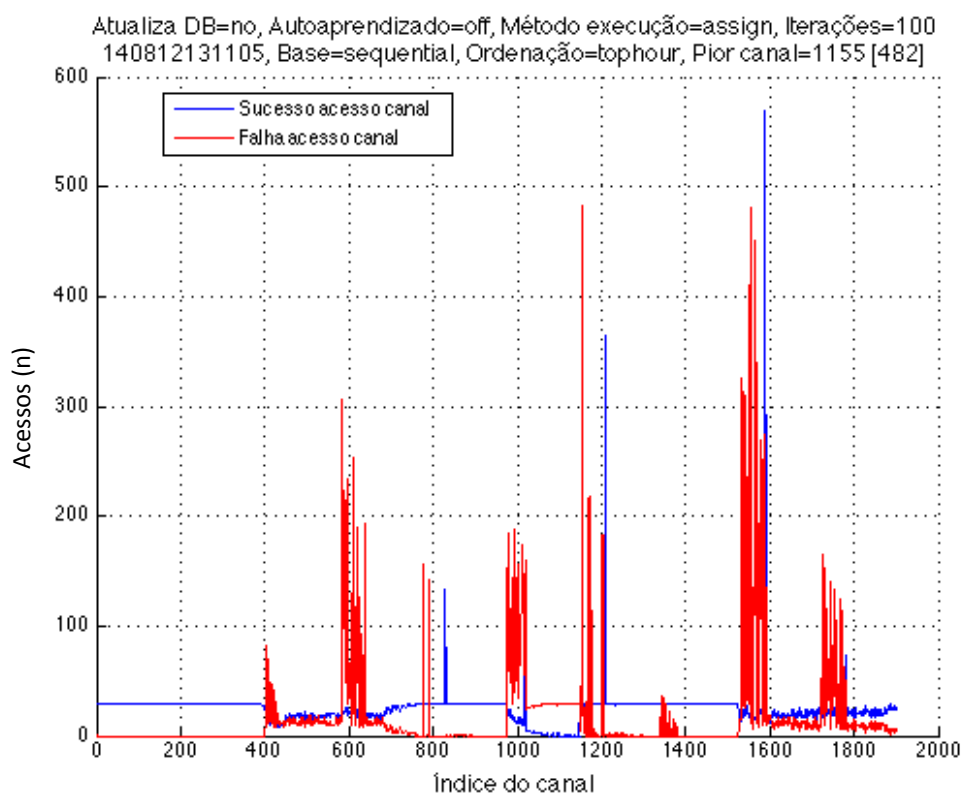
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 57,78 | 51200 | 5035 | 90,17 | 64,61 | 35,39 |

Fonte: o autor.

A Figura H.3a mostra a grande quantidade de acessos com falha (vermelho) em bandas mais ocupadas do espectro.

Figura H.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de larga escala.

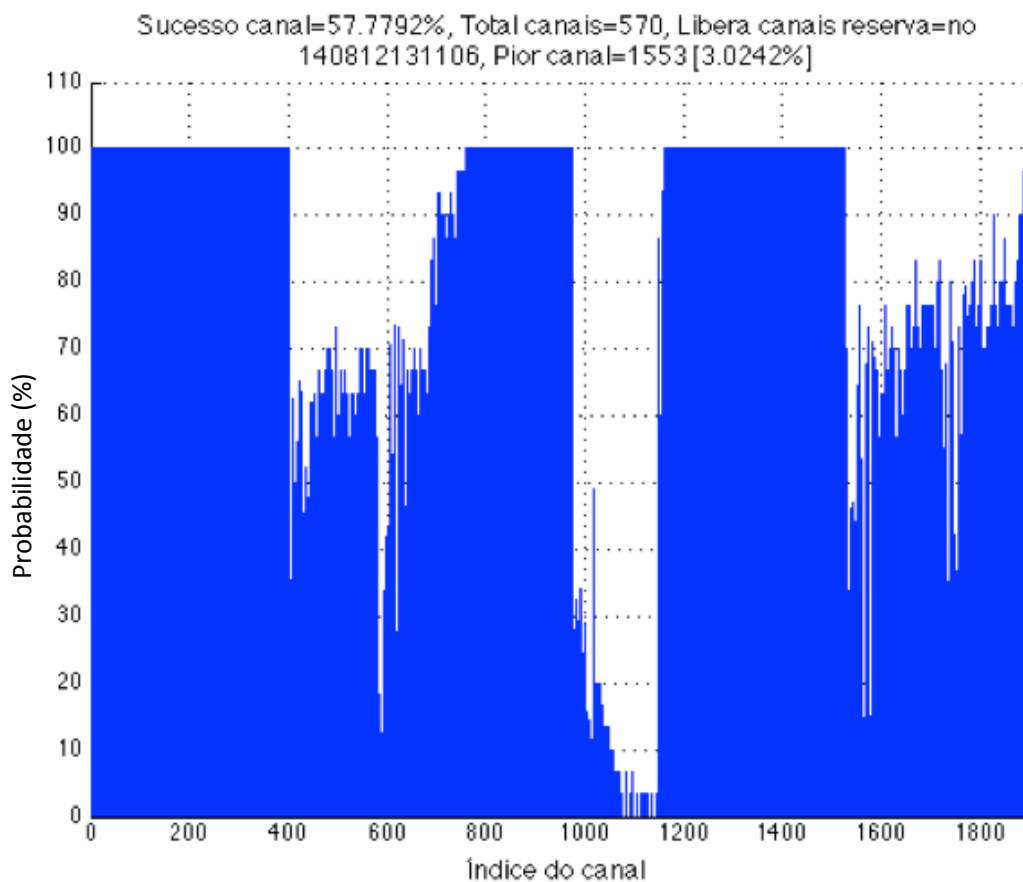
(a) Contadores de acesso aos canais.



A Figura H.3b mostra uma menor probabilidade de sucesso dos canais com maior falha na Figura H.3a.

Figura H.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de larga escala.

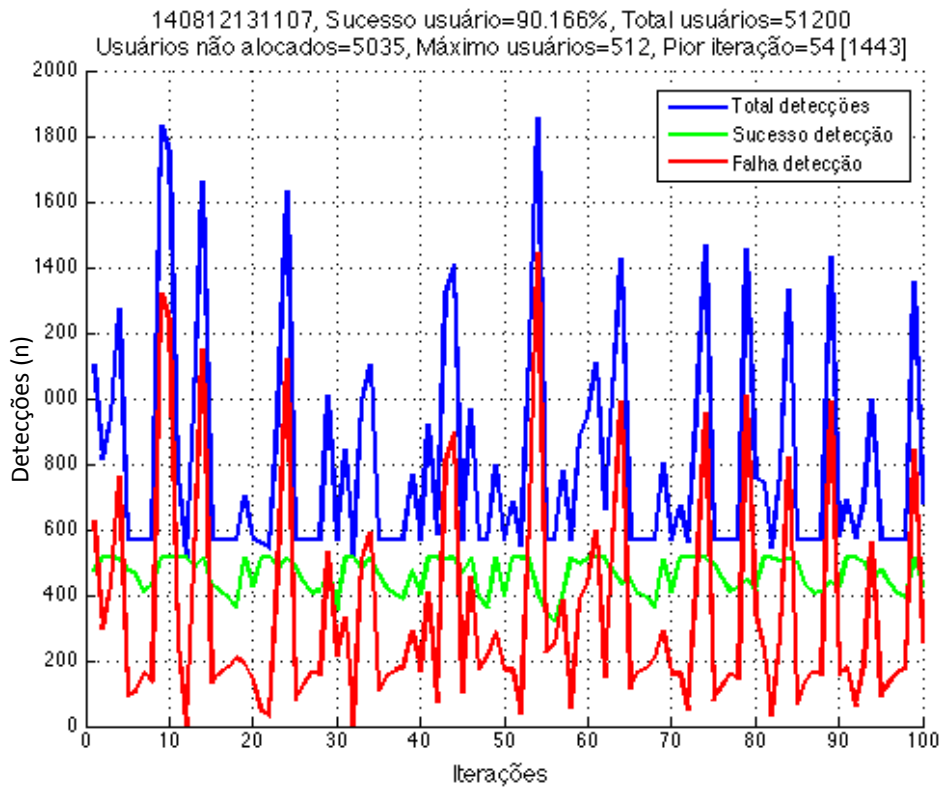
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Percebe-se na Figura H.3c que a grande quantidade de falhas neste cenário faz com que 5035 usuários não sejam alocados, apresentando probabilidade de sucesso de usuário de 90,17%.

Figura H.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de larga escala.

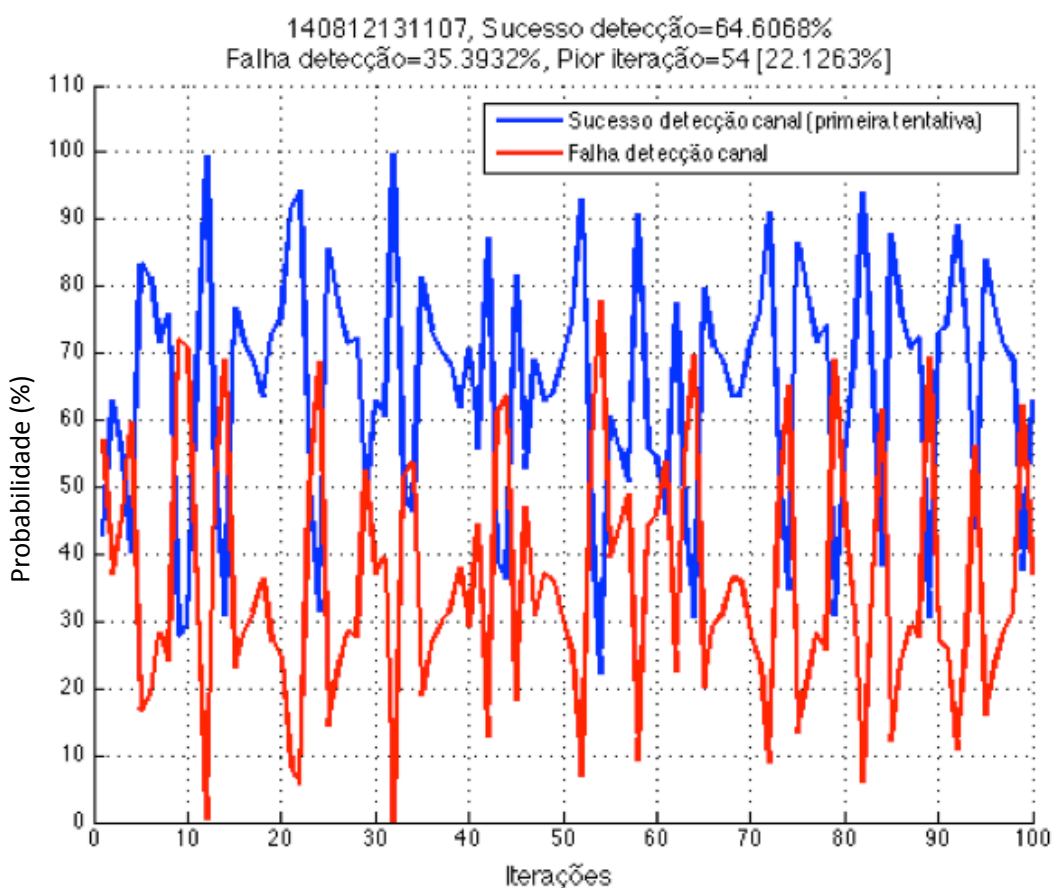
(c) Contadores de acesso do usuário.



Na Figura H.3d observa-se que a grande incidência de falhas de detecção (vermelho) faz com que a probabilidade de sucesso deste indicador caia para 64,61%.

Figura H.3 - Resultados da simulação do Cenário 3 em situação de larga escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

Cenário 4

A Tabela H.4 mostra os parâmetros de configuração utilizados e os resultados obtidos para o Cenário 4, com larga escala. A Figura H.4 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela H.4 - Parâmetros e resultados do Cenário 4 em situação de larga escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|-----------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | fixo | 100 | randômico | n/a | 570 | 0 | desligado |

(b) Resultados.

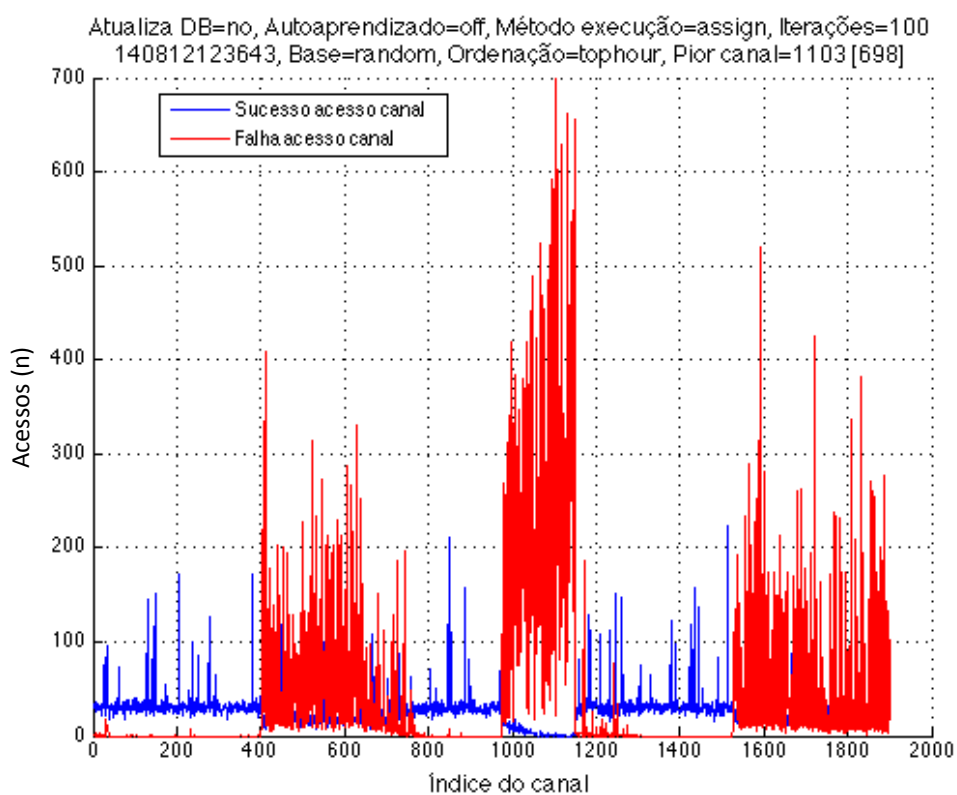
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 36,37 | 51200 | 1219 | 97,62 | 41,23 | 58,74 |

Fonte: o autor.

A Figura H.4a mostra muitos acessos nas faixas mais ocupadas do espectro, causando grande ocorrência de falhas (vermelho).

Figura H.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de larga escala.

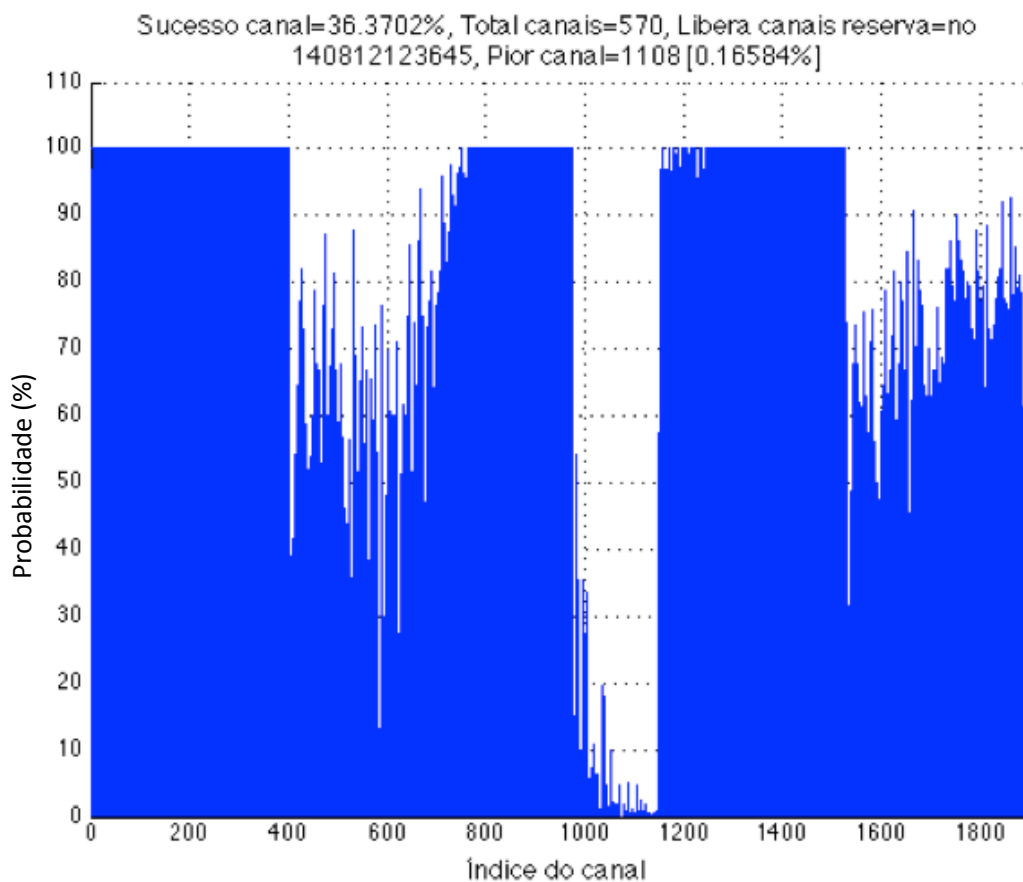
(a) Contadores de acesso aos canais.



Na Figura H.4b nota-se a baixa probabilidade de sucesso dos canais com maior quantidade de falhas de acesso.

Figura H.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de larga escala.

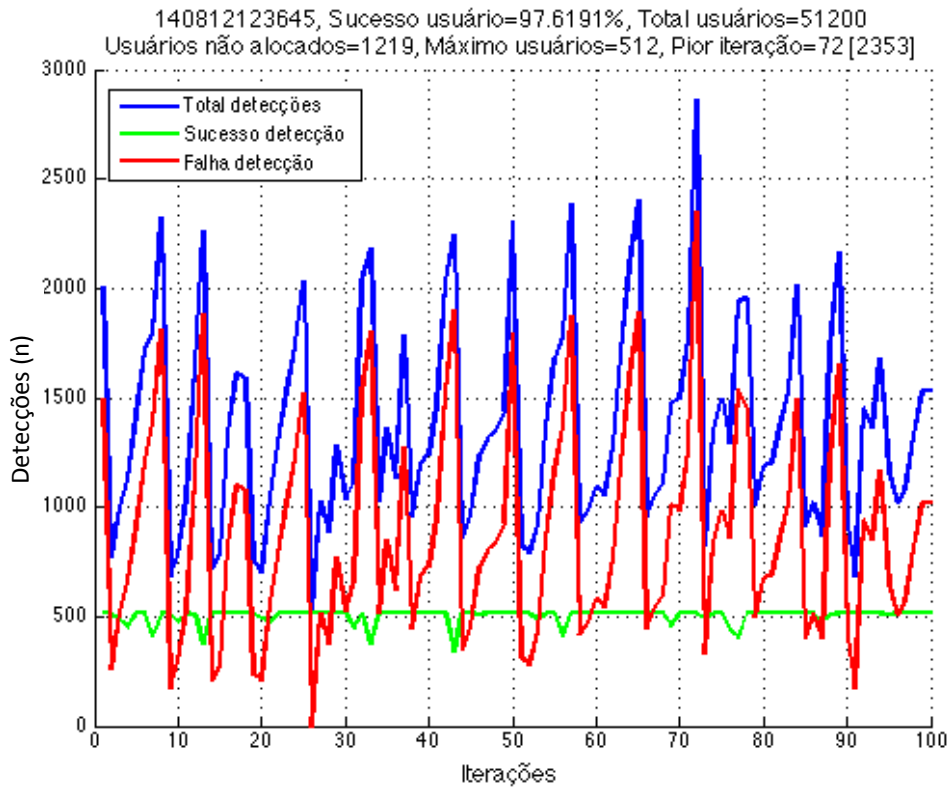
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



A Figura H.4c mostra que a grande quantidade de falhas de acesso (vermelho) faz com que 1219 SUs não sejam alocados, afetando o sucesso de detecção (verde).

Figura H.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de larga escala.

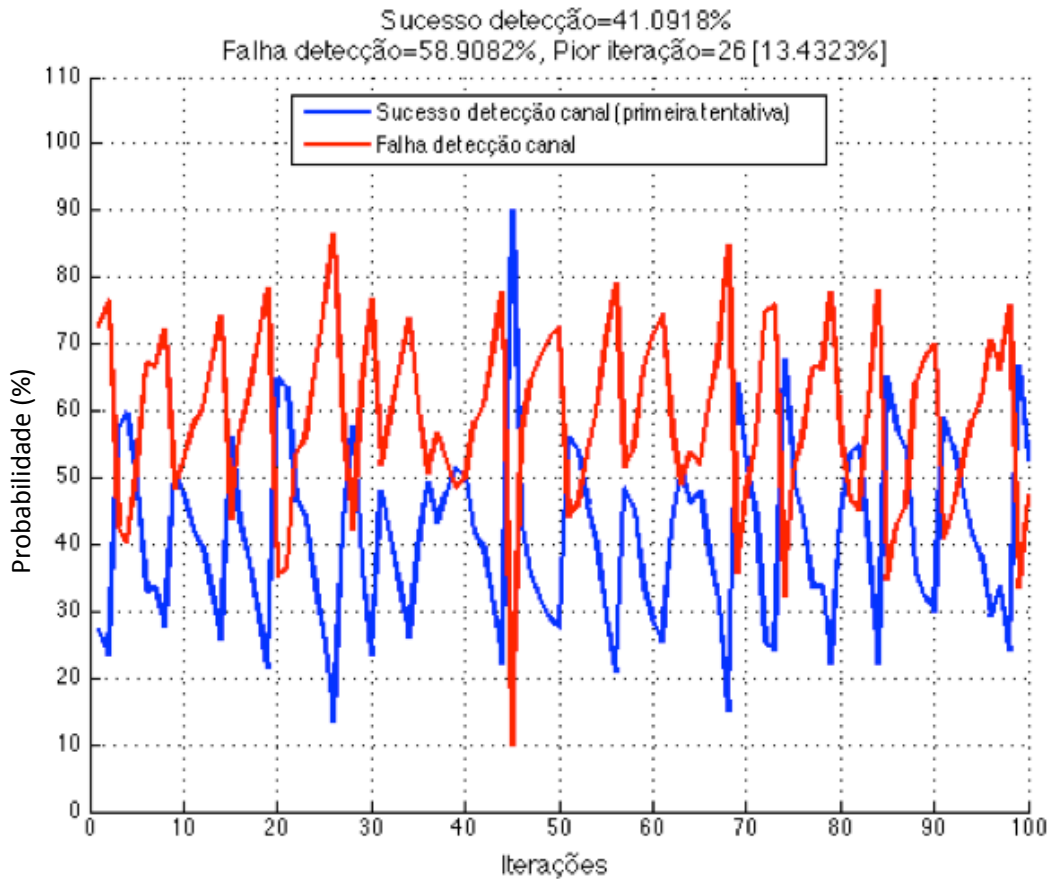
(c) Contadores de acesso do usuário.



A Figura H.4d mostra uma probabilidade de sucesso de detecção muito baixa (azul), chegando a apenas 41,09%.

Figura H.4 - Resultados da simulação do Cenário 4 em situação de larga escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

Cenário 5

A Tabela H.5 mostra os parâmetros de configuração utilizados e os resultados obtidos para o Cenário 5, com larga escala. A Figura H.5 mostra os gráficos referentes aos resultados deste cenário.

Tabela H.5 - Parâmetros e resultados do Cenário 5 em situação de larga escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | fixo | 100 | DB | sim | 570 | 0 | ligado |

(b) Resultados.

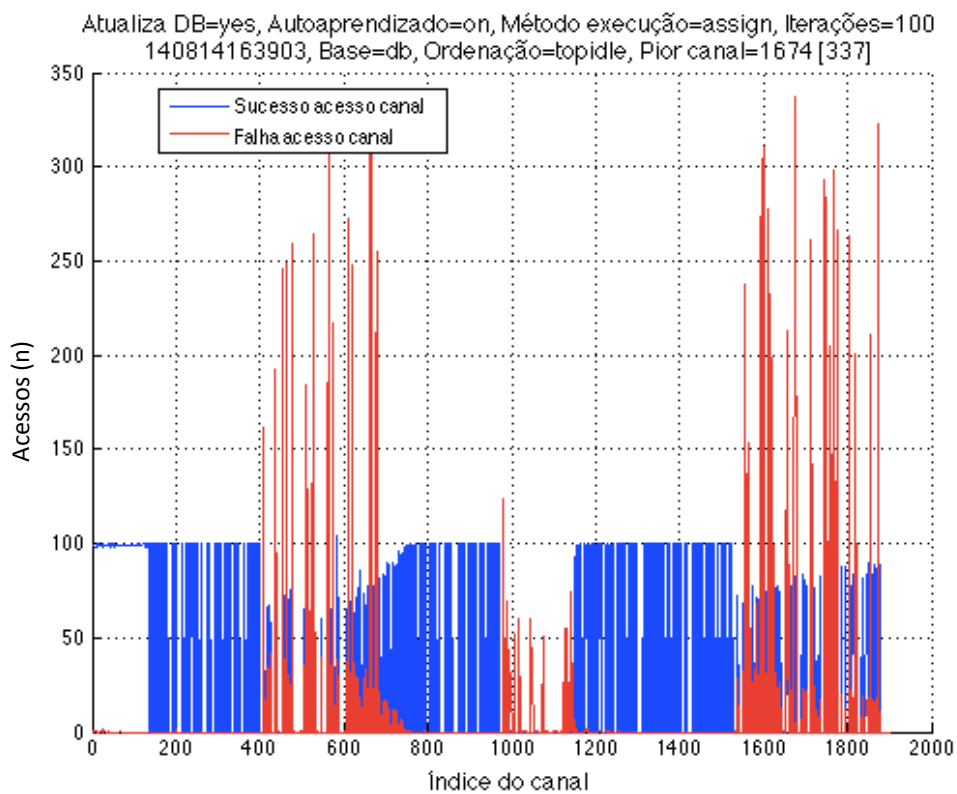
| Sucesso canal (%) | Total usuários (n) | Usuários não alocados (n) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 77,25 | 51200 | 23 | 99,96 | 78,88 | 21,12 |

Fonte: o autor.

A Figura H.5a mostra que muitos acessos ocorrem nas faixas mais ocupadas do espectro, por não haver dados de predição no início da operação.

Figura H.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de larga escala.

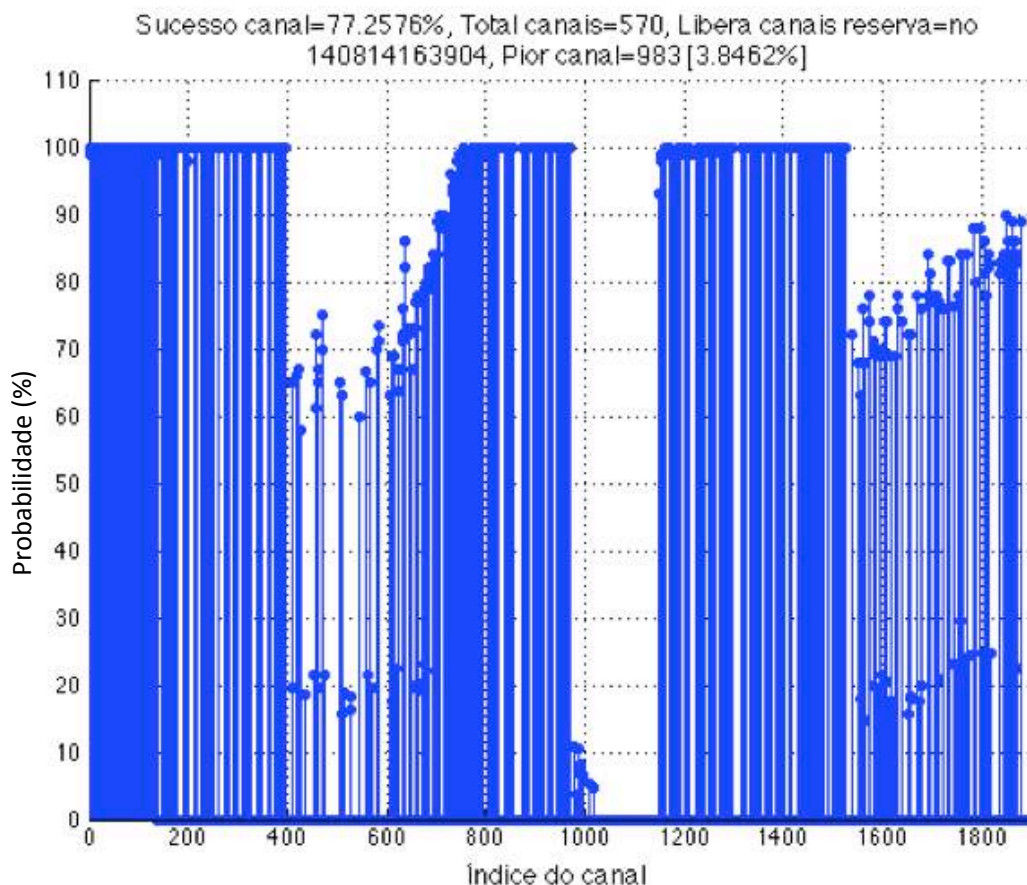
(a) Contadores de acesso aos canais.



A Figura H.5b confirma a baixa probabilidade de sucesso para os canais com maior falha na Figura H.5a.

Figura H.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de larga escala.

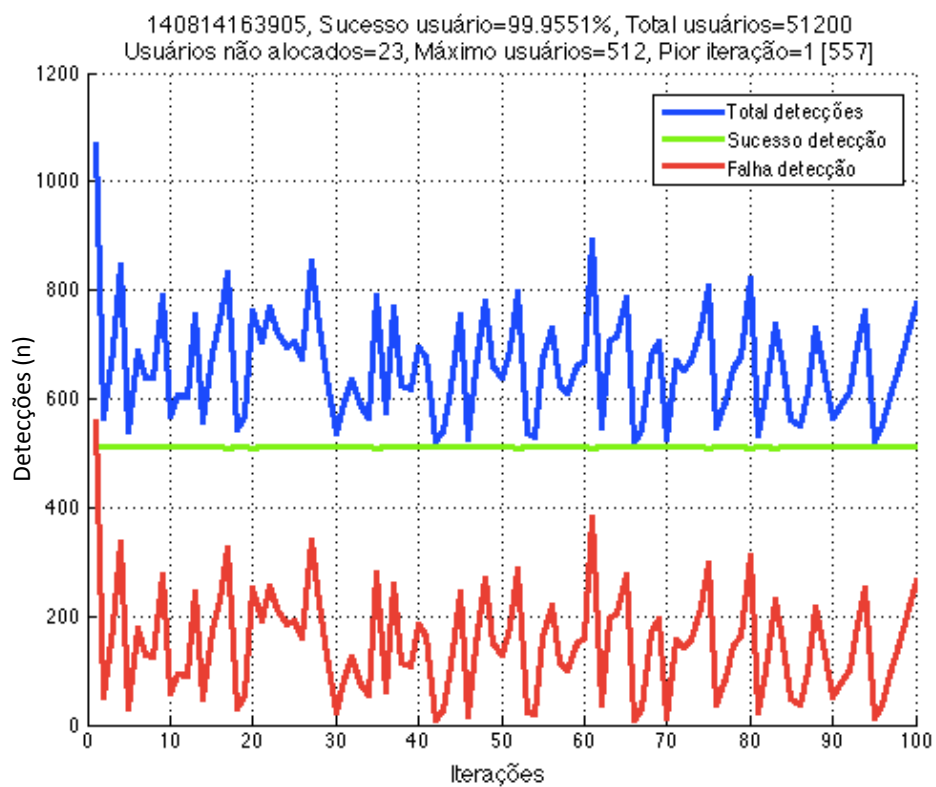
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



Pela Figura H.5c observa-se que apesar de uma quantidade de falhas maior que no Cenário 1, por exemplo, apenas 23 usuários não foram alocados.

Figura H.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de larga escala.

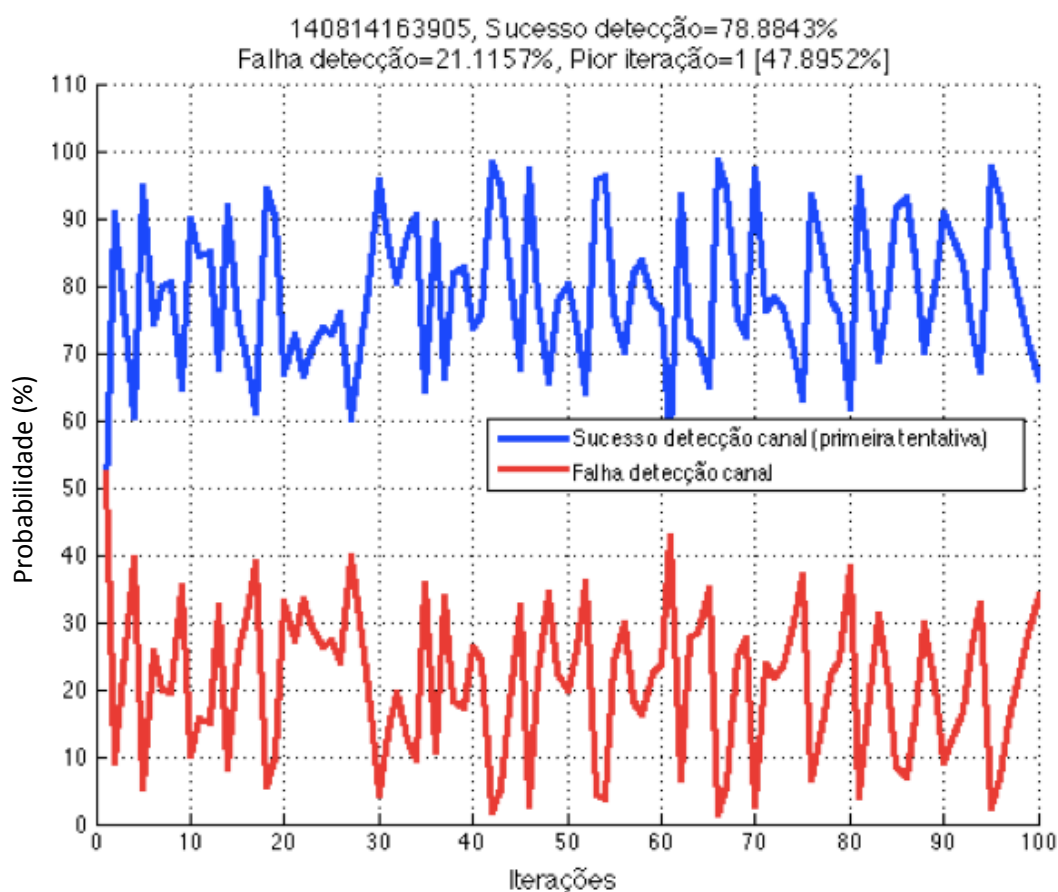
(c) Contadores de acesso do usuário.



A Figura H.5d mostra uma queda no sucesso de detecção, chegando à 78,88% neste cenário. Isto é causado pelo alto número de SUs e pela falta de dados de predição.

Figura H.5 - Resultados da simulação do Cenário 5 em situação de larga escala.

(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



Fonte: o autor.

Cenários de 1 a 5: Análise dos Resultados

A Tabela H.6 mostra um resumo dos resultados obtidos para os cinco cenários considerando uma simulação em larga escala.

Tabela H.6 - Tabela de resultados dos cenários de 1 a 5 em situação de larga escala.

| Cenário | Sucesso canal (%) | Sucesso usuário (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
|---------|-------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 1 | 93,02 | 100 | 93,68 | 6,32 |
| 2 | 82,01 | 100 | 85,07 | 14,93 |
| 3 | 57,78 | 90,17 | 64,61 | 35,39 |
| 4 | 36,37 | 97,62 | 41,23 | 58,74 |
| 5 | 77,25 | 99,96 | 78,88 | 21,12 |

Fonte: o autor.

Em um situação de larga escala (512 usuários, para 570 canais disponíveis), fica mais evidente a eficiência do Cenário 1 em relação aos outros cenários. O uso da predição dos canais, combinado com a atualização de estatísticas dos mesmos, é o que apresenta melhores resultados.

Na situação de larga escala destaca-se também o melhor desempenho global do Cenário 2 em relação ao Cenário 5. Nesta situação, a informação de predição dos canais (presente apenas no Cenário 2), é mais eficiente do que a atualização das estatísticas (presente somente no Cenário 5). Isto ocorre porque no Cenário 5 não há uma classificação dos canais. Assim, até que o SM/MAE consiga construir sua própria lista, acumula falhas de acesso nas primeiras iterações.

Cenário 6

Semelhante aos outros cenários de larga escala abordados até aqui, nesta simulação 512 SUs acessam a rede, sendo que destes, 102 são usuários de QoS. O número de canais disponíveis é 570.

A Tabela H.7 mostra os parâmetros de configuração utilizados na simulação, bem como os resultados obtidos. A Figura H.6 mostra os gráficos dos resultados.

Tabela H.7 - Parâmetros e resultados do Cenário 6 em situação de larga escala.

(a) Parâmetros.

| Usuários | Modo usuários | Iterações | Método | Atualiza DB | Espectro útil | Usuários QoS | Autoaprendizado |
|----------|---------------|-----------|--------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 512 | fixo | 100 | DB | sim | 570 | 102 | desligado |

(b) Resultados.

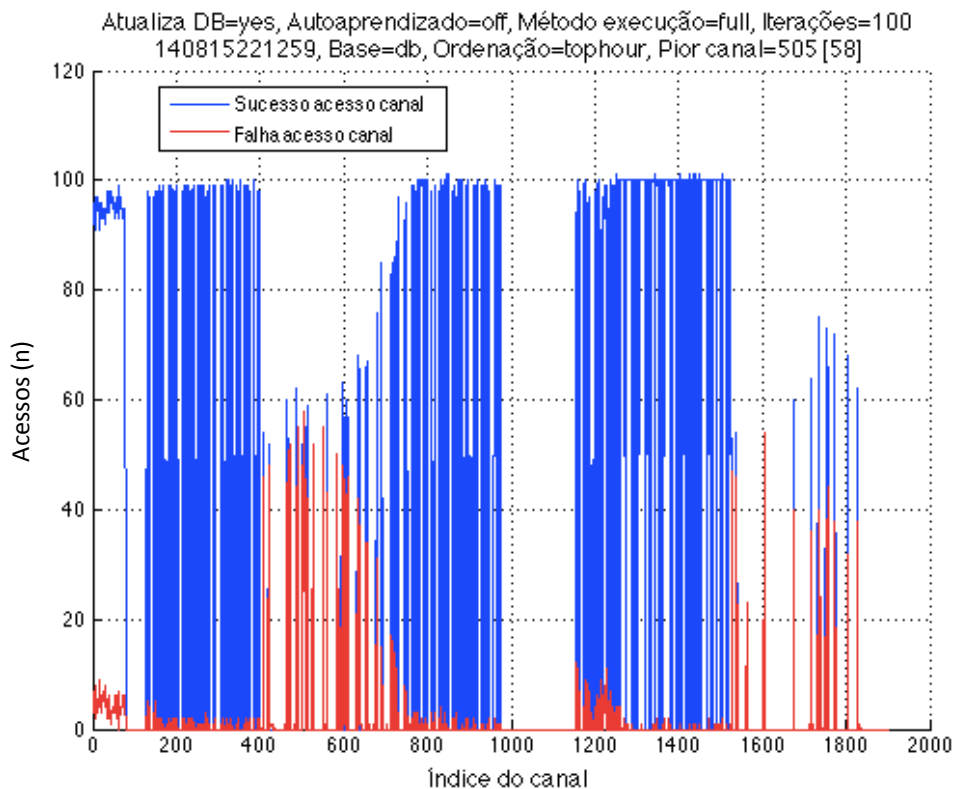
| Sucesso canal (%) | Total SU comum (n) | SU comum não alocado (n) | Sucesso SU comum (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) | Total SU QoS (n) | SU QoS não alocado (n) | Sucesso SU QoS (%) | Sucesso detecção QoS (%) | Falha detecção QoS (%) |
|-------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|
| 93,76 | 41000 | 30347 | 25,76 | 93,84 | 6,17 | 10200 | 5239 | 48,64 | 95,28 | 4,22 |

Fonte: o autor.

A Figura H.6a mostra um número maior de acessos nas faixas congestionadas (vermelho) devido à presença dos SUs de QoS.

Figura H.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de larga escala.

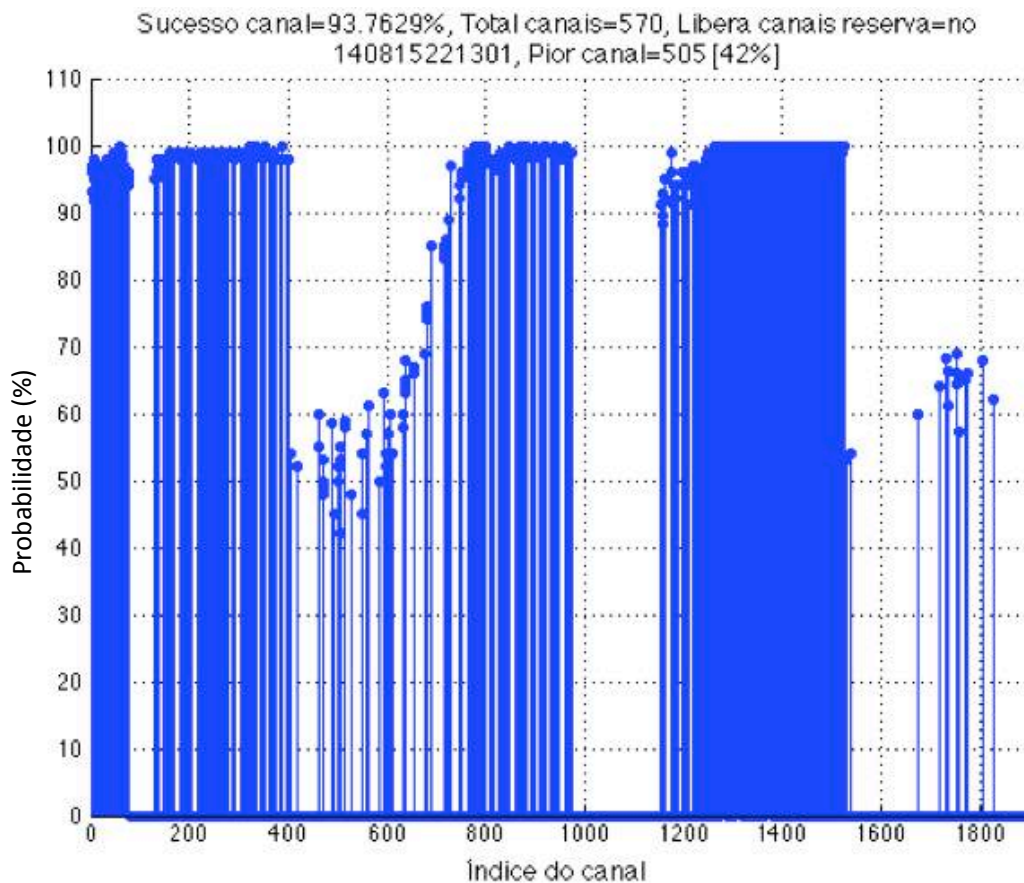
(a) Contadores de acesso aos canais.



A Figura H.6b confirma o pior desempenho dos canais com maior falha.

Figura H.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de larga escala.

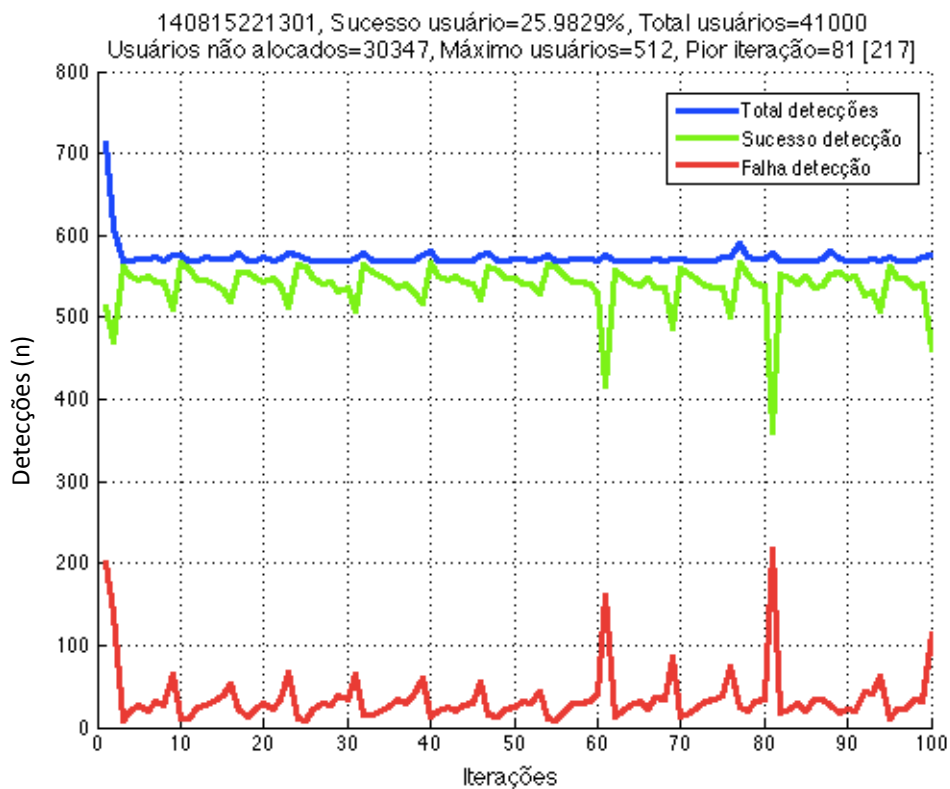
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



A Figura H.6c mostra uma grande queda no número de SUs alocados chegando à apenas 25,98% de sucesso.

Figura H.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de larga escala.

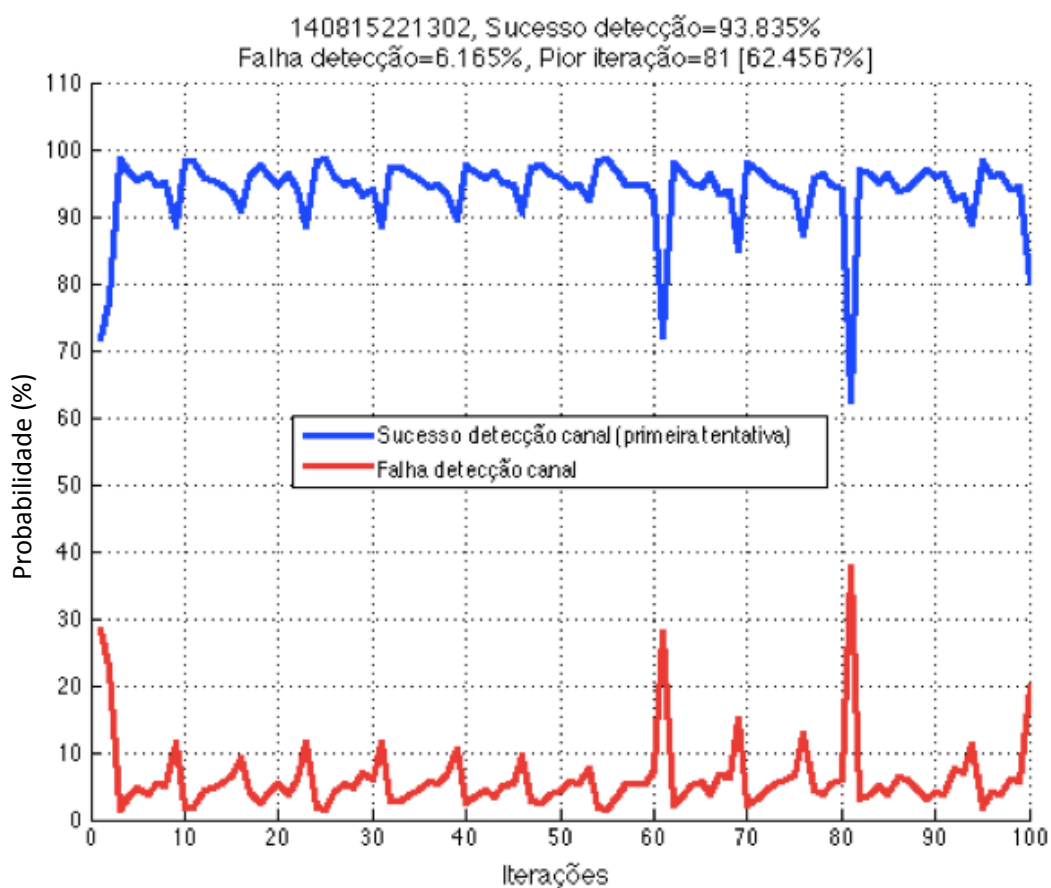
(c) Contadores de acesso do usuário.



A Figura H.6d mostra que apesar do grande número de usuários rejeitados, a probabilidade de sucesso de detecção média ficou em 93,84%.

Figura H.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de larga escala.

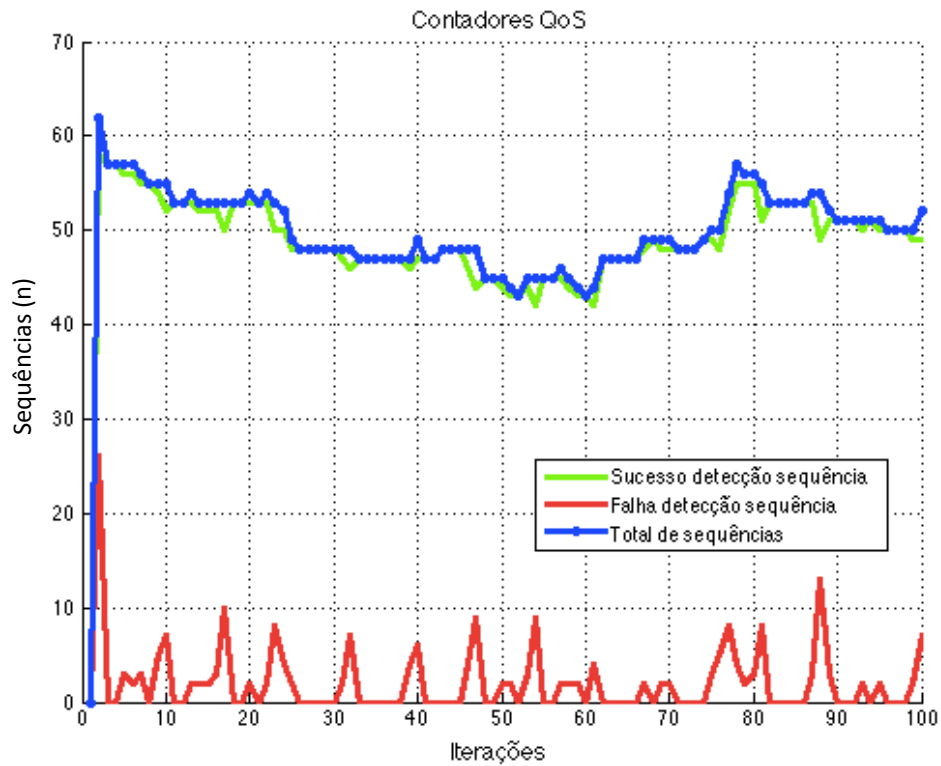
(d) Probabilidade de sucesso de detecção.



A Figura H.6e mostra que, apesar das falhas de alocação (vermelho), os sucessos de alocação de SU de QoS (verde) são bem próximos do número de seqüências disponíveis no espectro (azul).

Figura H.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de larga escala.

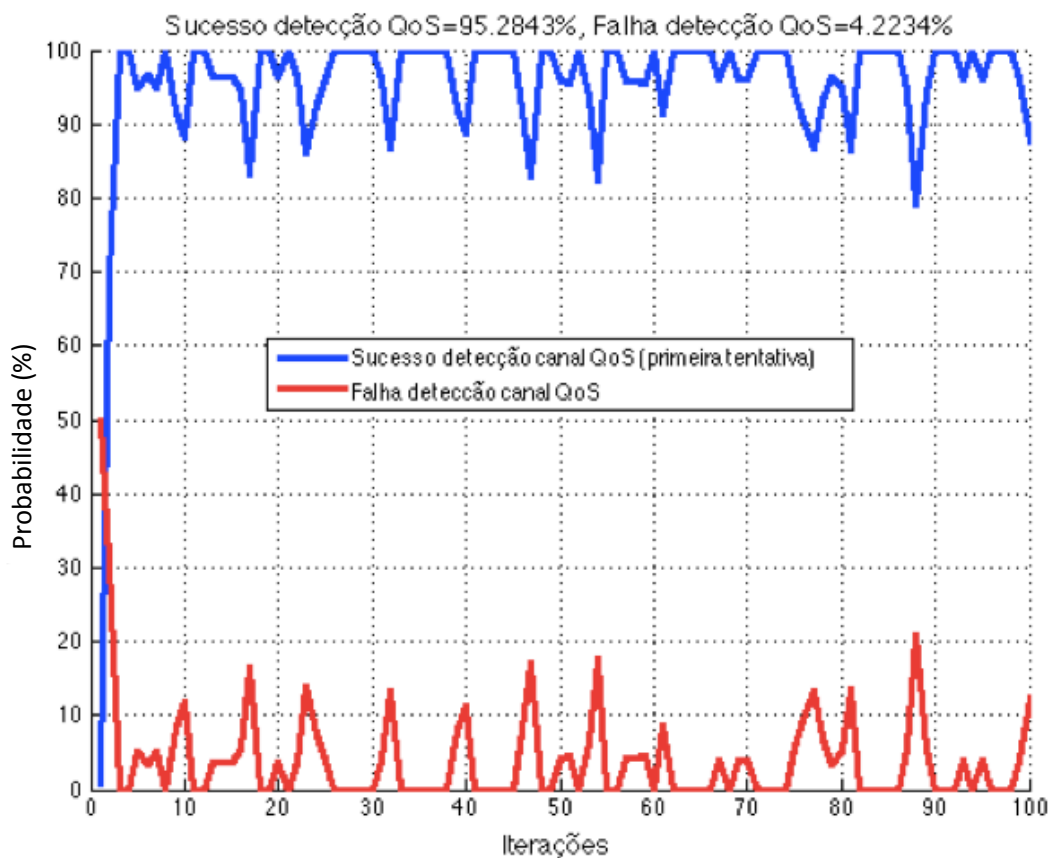
(e) Contadores de QoS.



A Figura H.6f mostra que a detecção de canais de QoS apresentou uma probabilidade de sucesso de 95,28%.

Figura H.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de larga escala.

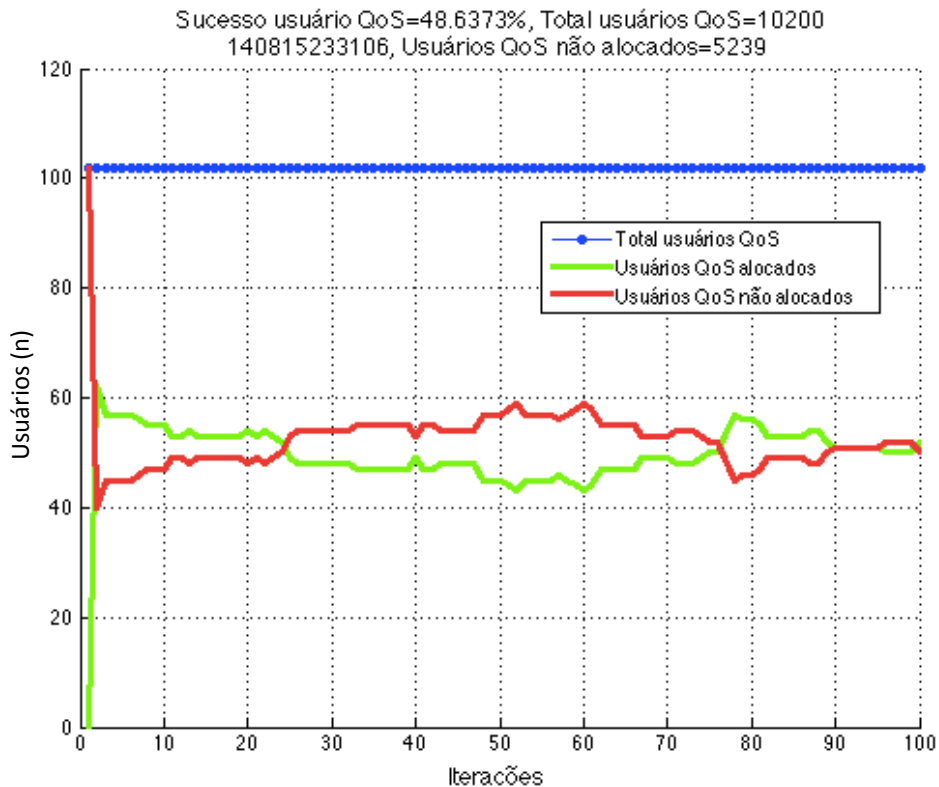
(f) Probabilidade de sucesso na detecção de canal de QoS.



Na Figura H.6g percebe-se que o número de sequências disponíveis no espectro não é suficiente para atender todos os usuários (azul), fazendo com que o número de SUs alocados seja bem inferior aos 102 usuários de cada iteração.

Figura H.6 - Resultados da simulação do Cenário 6 em situação de larga escala.

(g) Usuários de QoS.



Fonte: o autor.

Cenário 6: Análise dos Resultados

A Tabela H.8 apresenta os resultados das três simulações realizadas para o Cenário 6, incluindo os cenários de pequena e média escala. Fora a presença dos usuários de QoS, não há diferenças nas configurações destas simulações com as realizadas no Cenário 1.

Já a Tabela H.9 apresenta os indicadores das três simulações realizadas para o Cenário 1, incluindo os cenários de pequena e média escala. A mesma será utilizada para comparação com os resultados obtidos no Cenário 6.

Se comparadas as tabelas H.8 e H.9, quando a demanda de canais é pequena, não há uma alteração expressiva nos indicadores. No Cenário 6 houve

uma ligeira queda no indicador *Sucesso Canal* e *Sucesso detecção*, mas é possível afirmar que a presença de usuários de QoS não impacta na alocação de usuários comuns. Nessa situação, 86,75% dos SUs de QoS e 100% dos SUs comuns conseguiram ser alocados. Conforme visto na Seção 7.6.1, é esperado que o indicador *Sucesso SU QoS* apresente índice inferior ao *Sucesso SU comum*, em função da disponibilidade de sequências no espectro ser de difícil previsão.

Tabela H.8 - Resultados das simulações do Cenário 6.

| Cenário 6 | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|
| Escala | Sucesso canal (%) | Total SU comum (n) | SU comum não alocado (n) | Sucesso SU comum (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) | Total SU QoS (n) | SU QoS não alocado (n) | Sucesso SU QoS (%) | Sucesso detecção QoS (%) | Falha detecção QoS (%) |
| Pequena | 94,3 | 8000 | 0 | 100 | 96,57 | 3,43 | 2000 | 265 | 86,75 | 94,7 | 4,81 |
| Larga | 93,76 | 41000 | 30347 | 25,76 | 93,84 | 6,17 | 10200 | 5239 | 48,64 | 95,28 | 4,22 |
| Média | 93,3 | 19799 | 3166 | 78,75 | 94,84 | 5,16 | 4950 | 1824 | 57,18 | 97,61 | 2,39 |

Fonte: o autor.

Conforme pode ser observado na Tabela H.9, o indicador *Sucesso SU comum* se manteve em 100% nas três simulações. Na Tabela H.8 é possível constatar que as probabilidades de detecção, tanto para SU comum quanto para SU de QoS, se mantiveram com bons índices nas três simulações realizadas para o Cenário 6, apresentando valores próximos do Cenário 1. No entanto, os indicadores *Sucesso SU comum* e *Sucesso SU QoS* foram fortemente impactados devido à presença dos usuários de QoS. Para os cenários de larga e média escala, os usuários comuns são bastantes afetados pela ocupação das sequências de canais no espectro. Na situação de larga escala, por exemplo, o indicador *Sucesso SU comum* chegou a 25,76%. Neste cenário os SUs de QoS apresentam melhor índice que os SUs comuns, pois sua alocação é feita em primeiro lugar, conforme visto na Seção 5.3.

Tabela H.9 - Resultados das simulações do Cenário 1.

| Cenário 1 | | | | | | |
|-----------|-------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| Escala | Sucesso canal (%) | Total SU comum (n) | SU comum não alocado (n) | Sucesso SU comum (%) | Sucesso detecção (%) | Falha detecção (%) |
| Pequena | 98,11 | 10000 | 0 | 100 | 98,3 | 1,7 |
| Larga | 93,02 | 51200 | 0 | 100 | 93,68 | 6,32 |
| Média | 96,26 | 25459 | 0 | 100 | 97,31 | 2,69 |

Fonte: o autor.

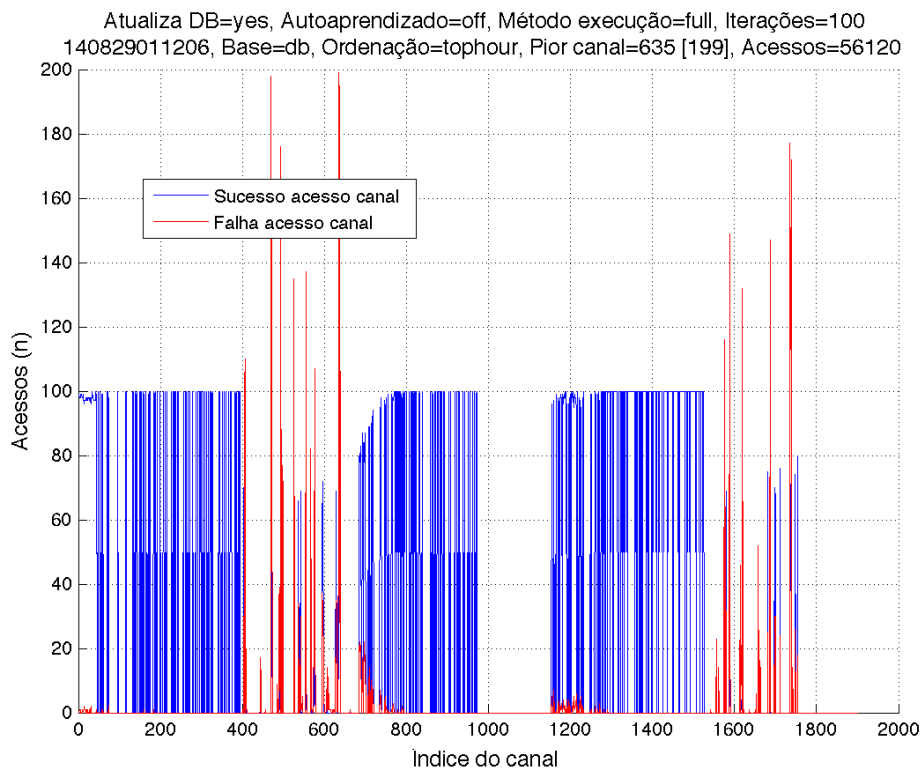
As boas probabilidades apresentadas pelos indicadores *Sucesso detecção* e *Sucesso detecção QoS*, especialmente no cenário de larga escala, demonstram o bom desempenho do método que utiliza base de dados adaptativa com informação estatística dos canais. As quedas em indicadores como *Sucesso SU comum* e *Sucesso SU QoS* se justificam por não haver canais disponíveis para alocação desses usuários. Nesse tipo de situação, a *base station* rejeita tais usuários impedindo que os mesmos se registrem na rede.

Apêndice I - Resultados Detecção Canal

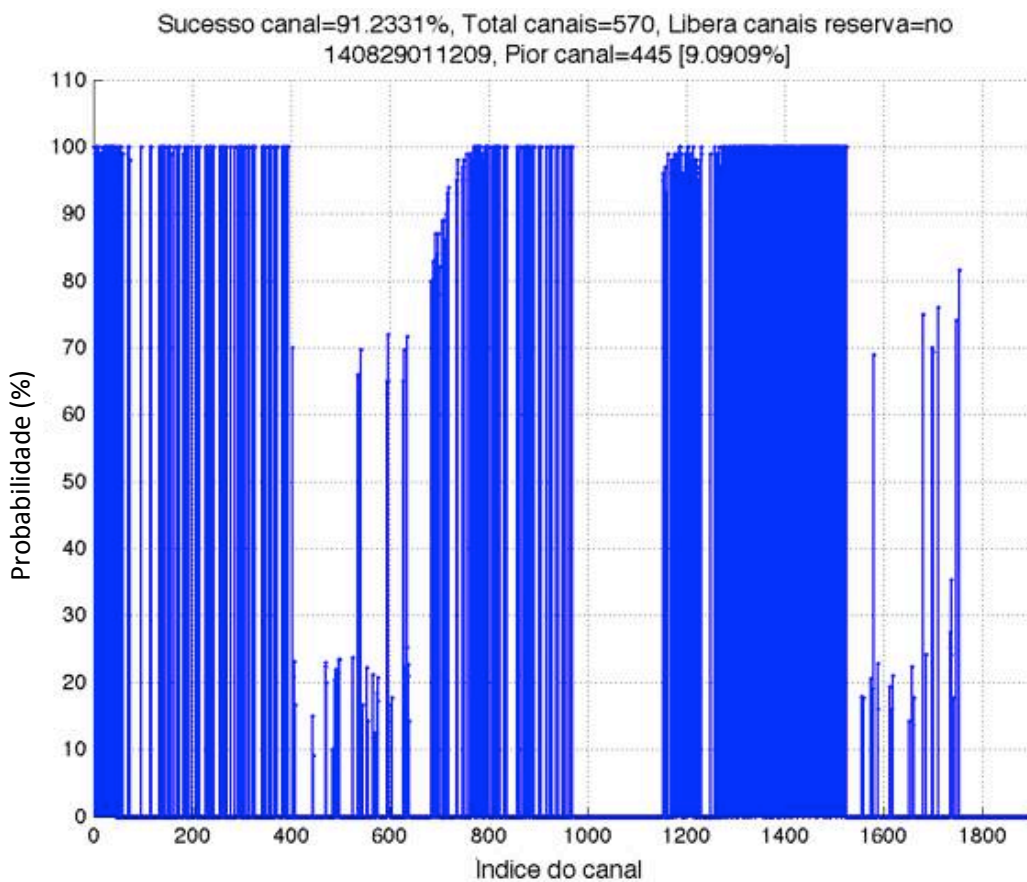
Neste apêndice são apresentados os gráficos referentes às simulações realizadas para os cinco cenários utilizados na Seção 6.1.7.

Figura I.1 - Cenário 1: resultados de simulação para análise de detecção de canal.

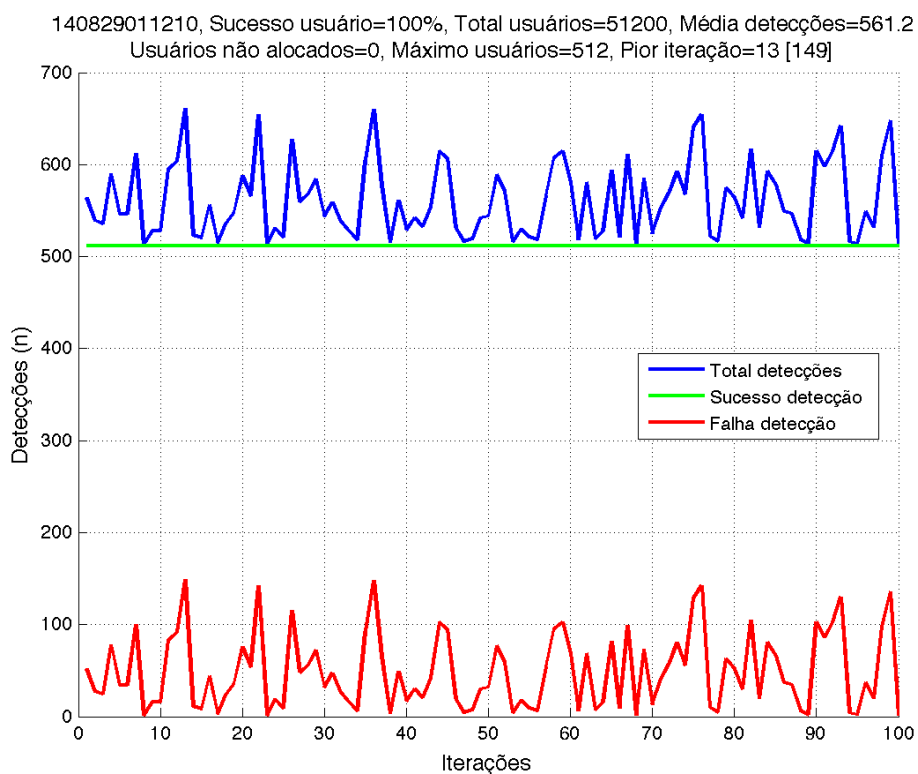
(a) Acesso aos canais.



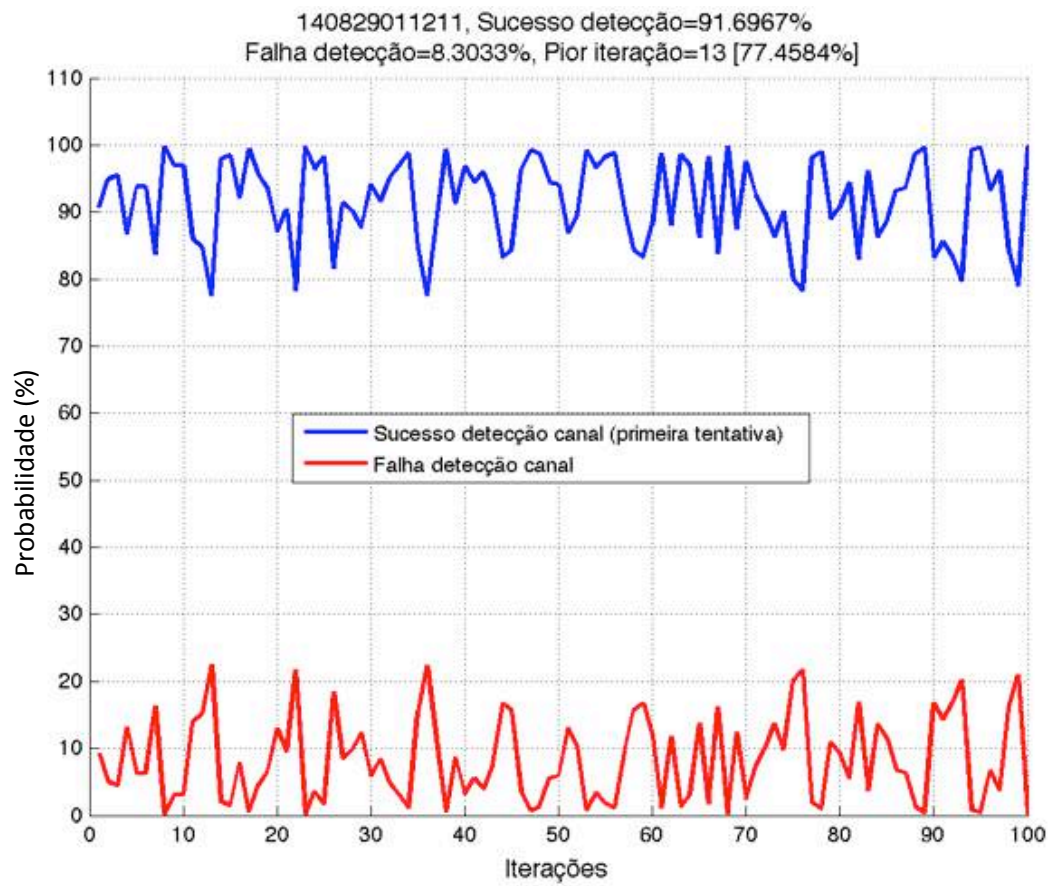
(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



(c) Detecções de canal.



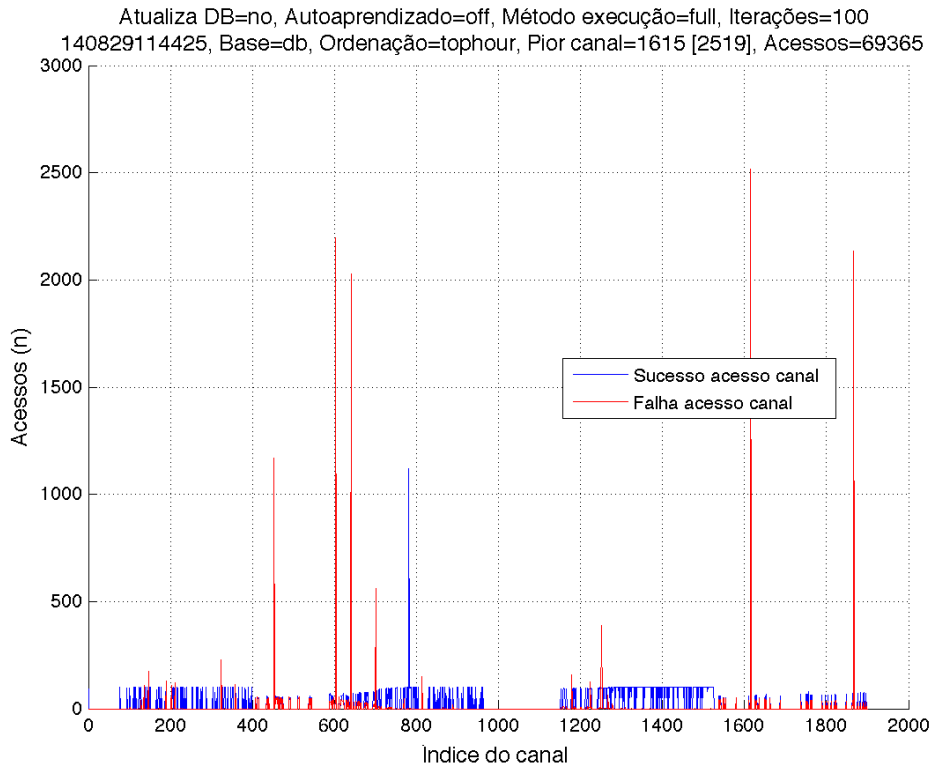
(d) Probabilidade de detecção de canal.



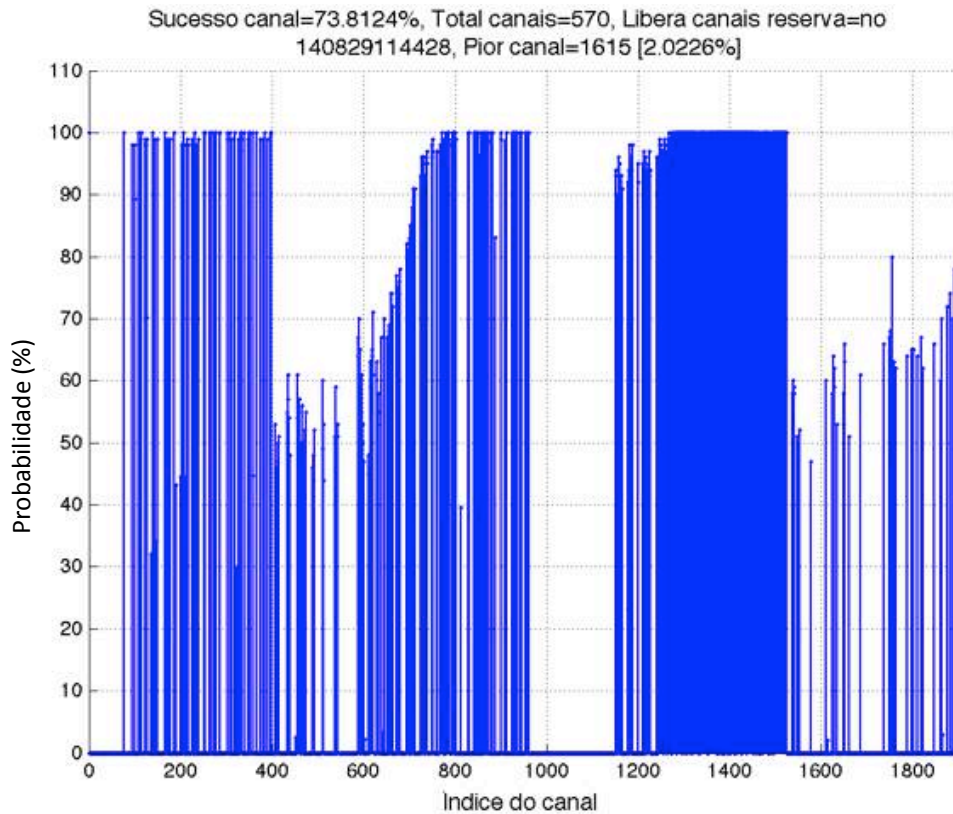
Fonte: o autor.

Figura I.2 - Cenário 2: resultados de simulação para análise de detecção de canal.

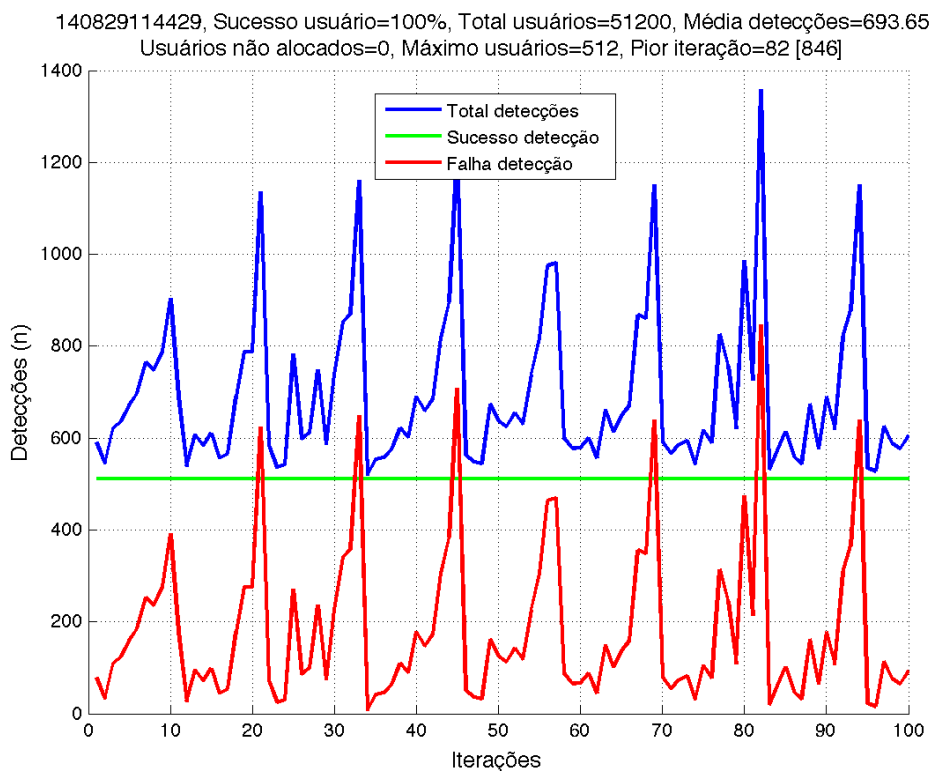
(a) Acesso aos canais.



(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



(c) Detecções de canal.



(d) Probabilidade de detecção de canal.

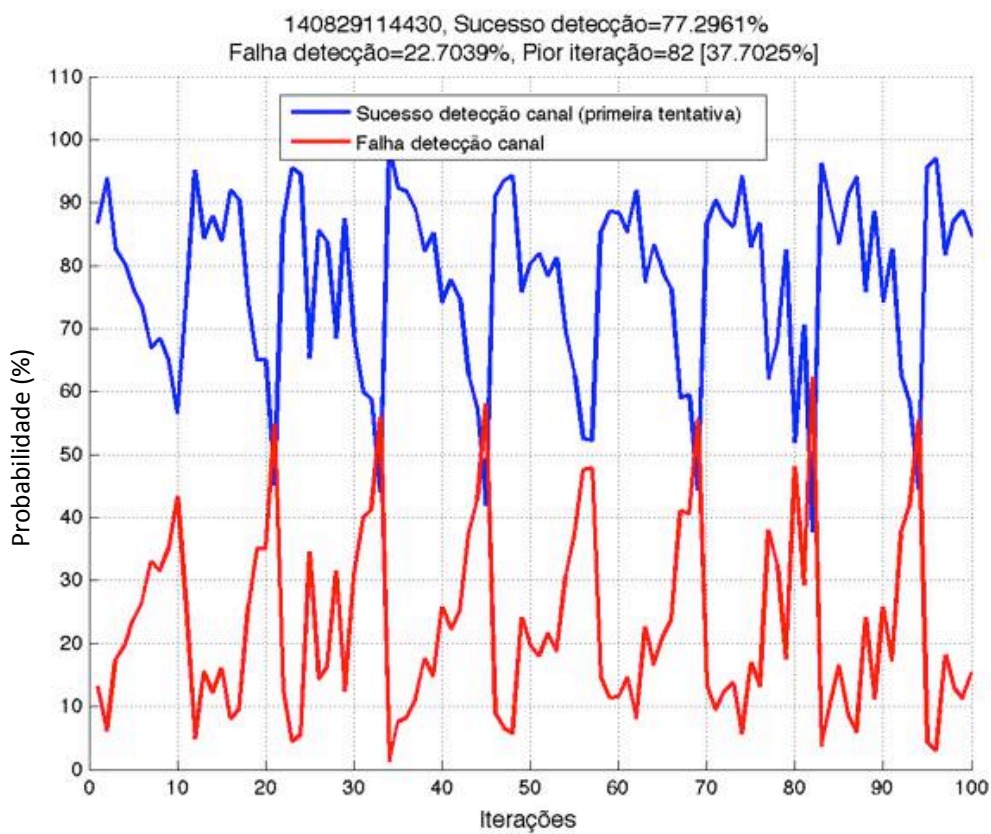
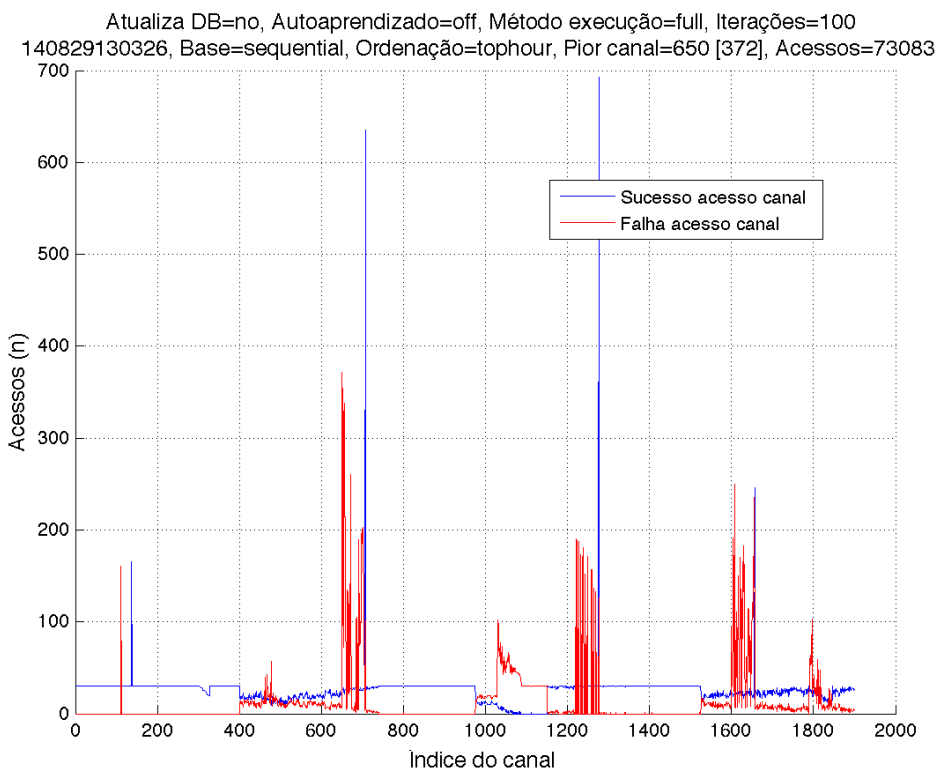
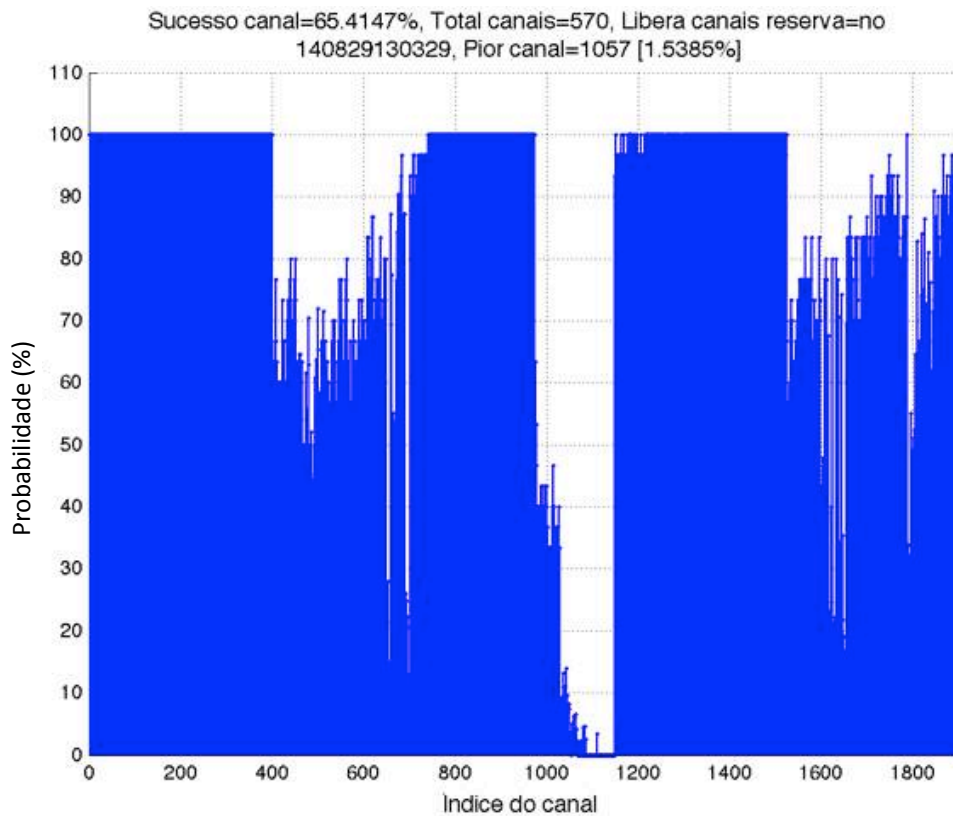


Figura I.3 - Cenário 3: resultados de simulação para análise de detecção de canal.

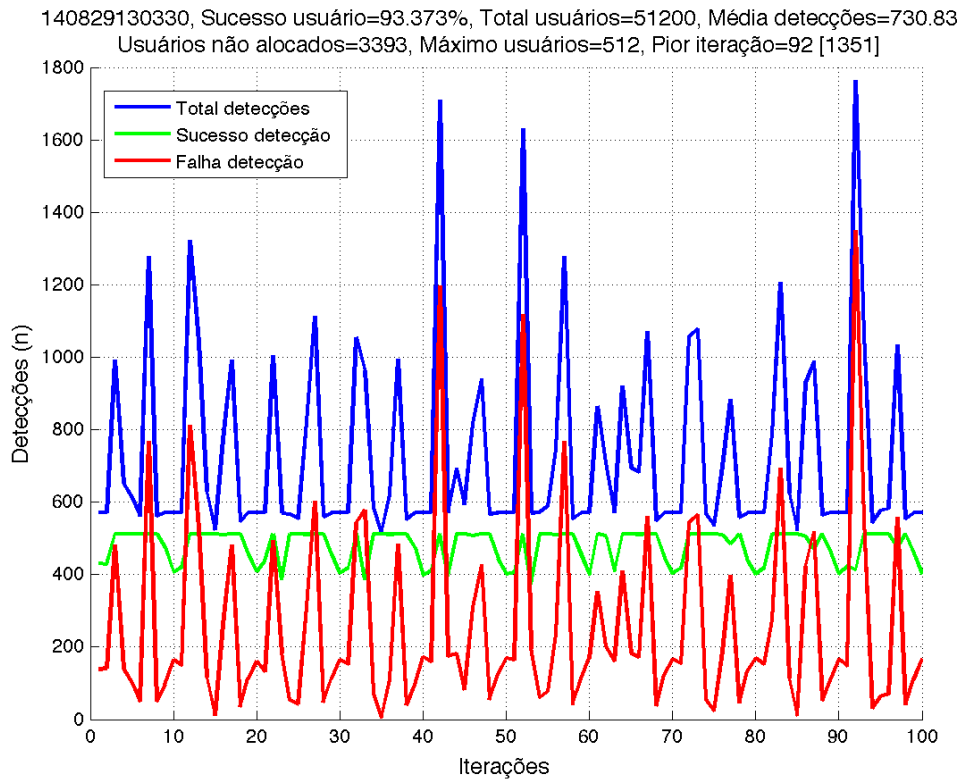
(a) Acesso aos canais.



(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



(c) Detecções de canal.



(d) Probabilidade de detecção de canal.

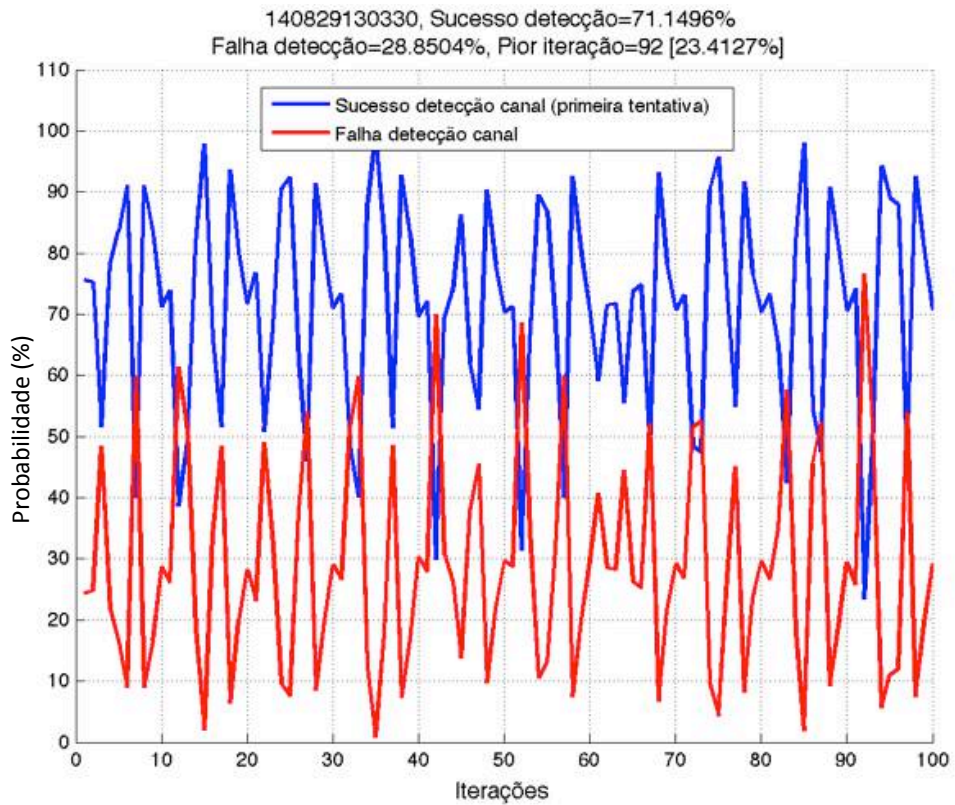
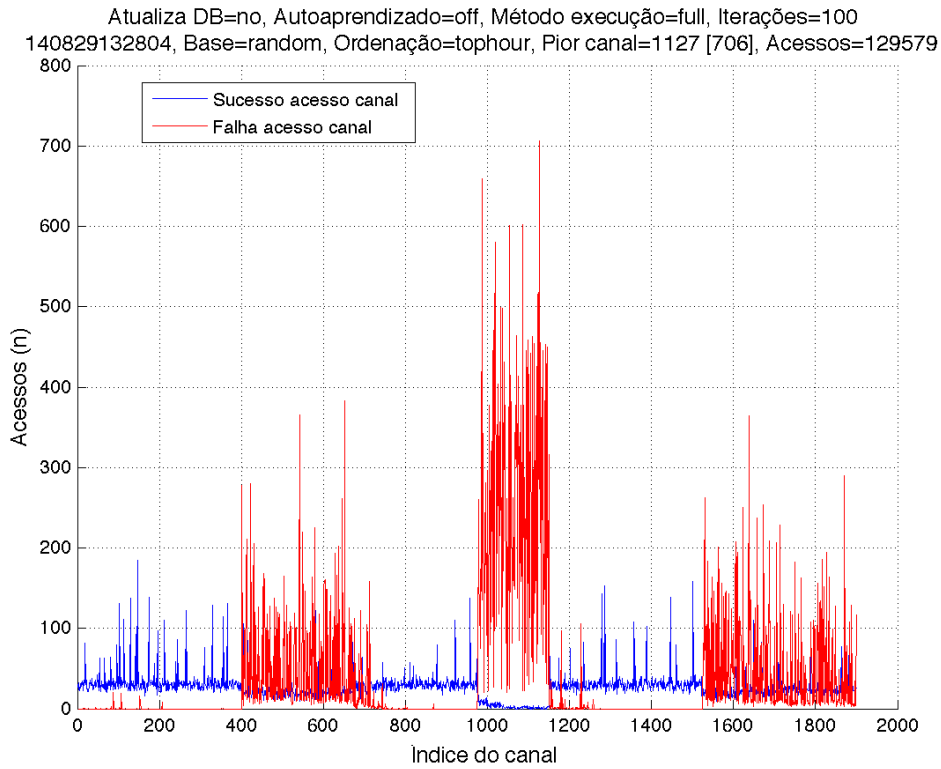
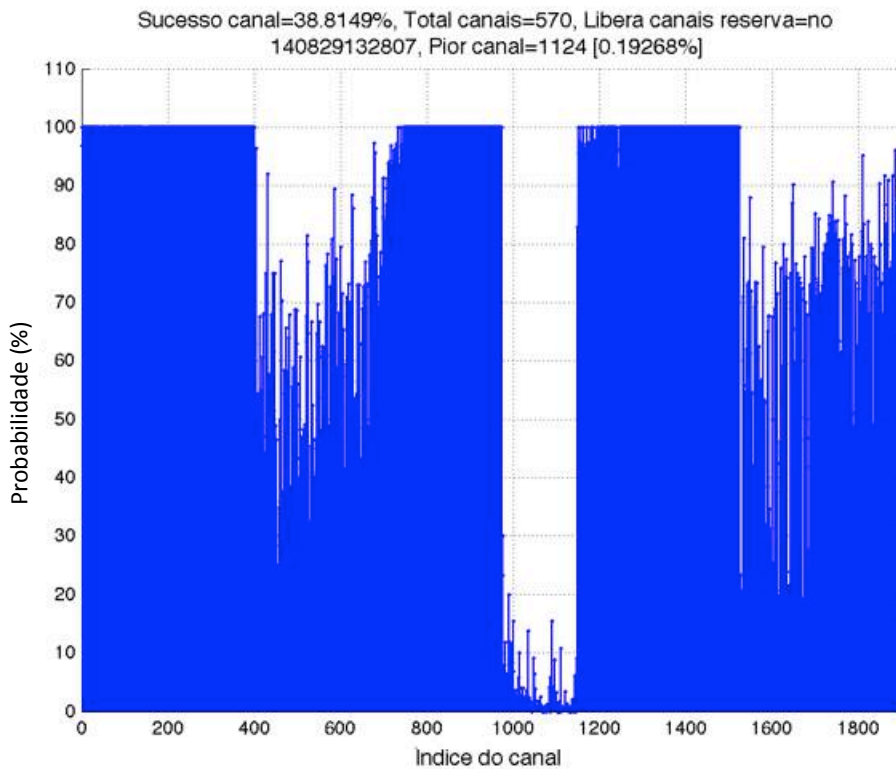


Figura I.4 - Cenário 4: resultados de simulação para análise de detecção de canal.

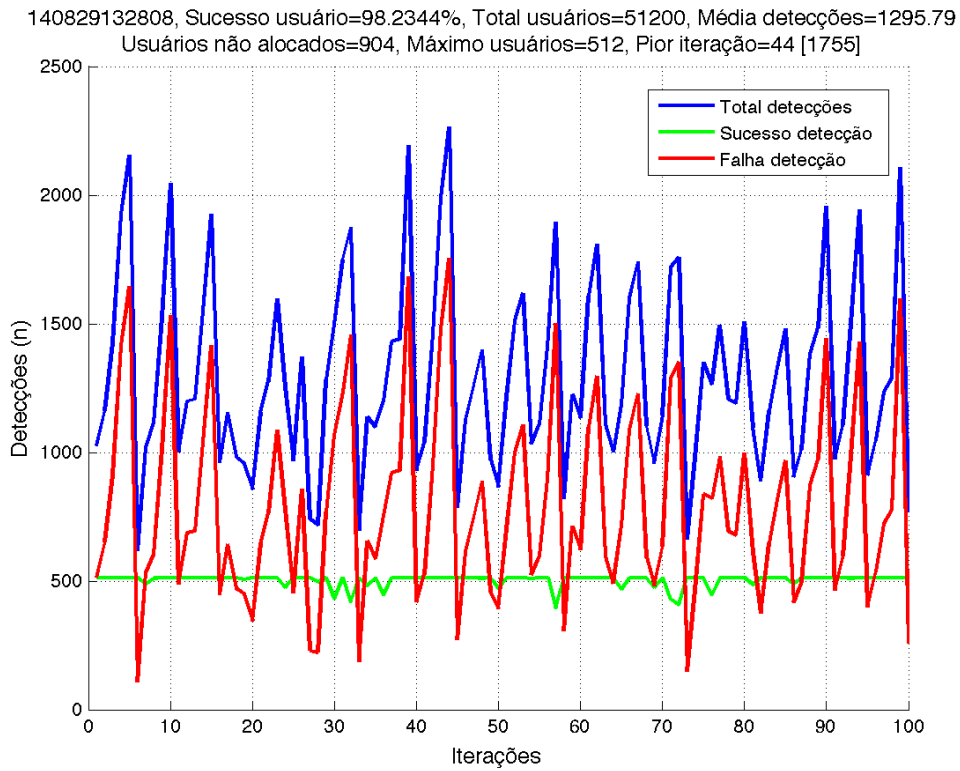
(a) Acesso aos canais.



(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



(c) Detecções de canal.



(d) Probabilidade de detecção de canal.

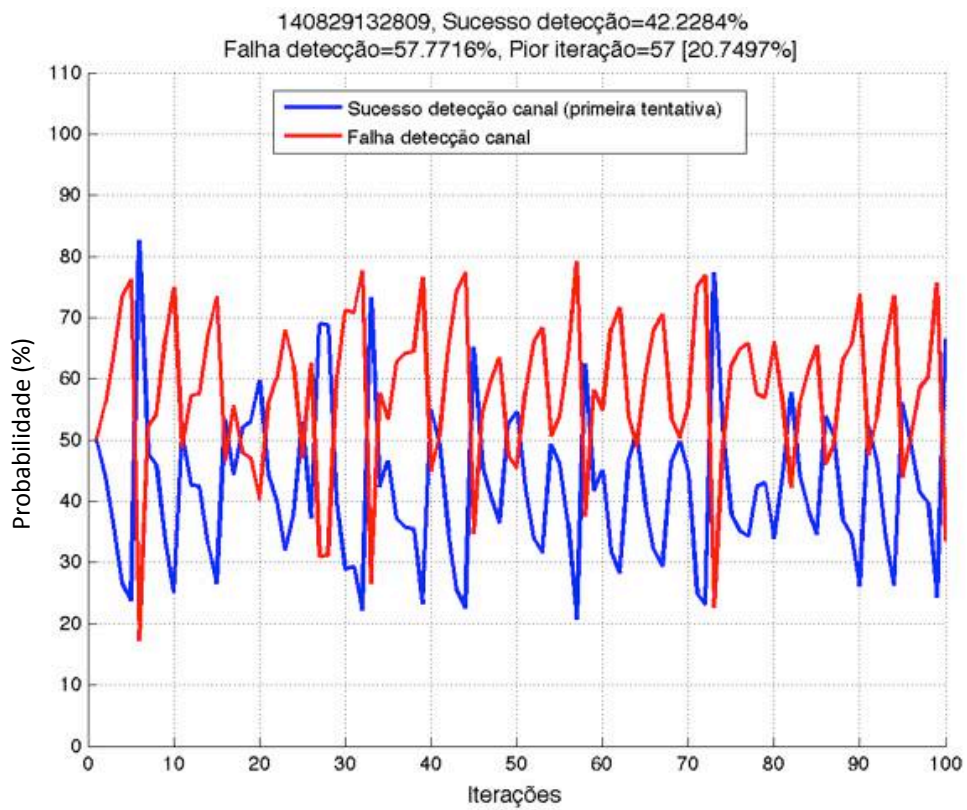
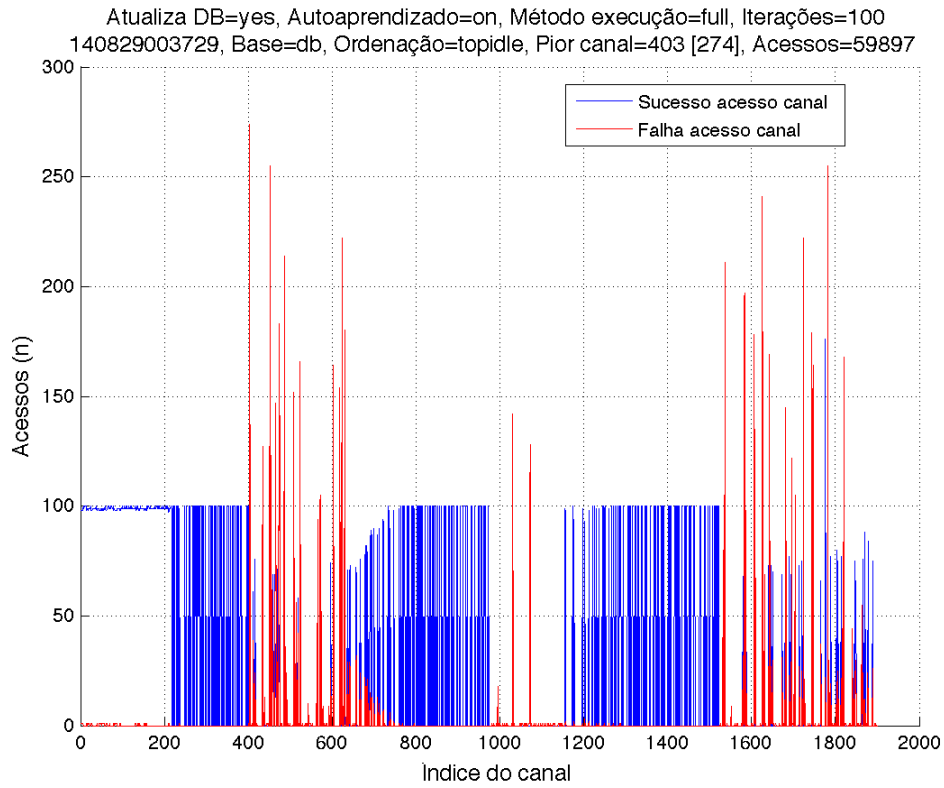
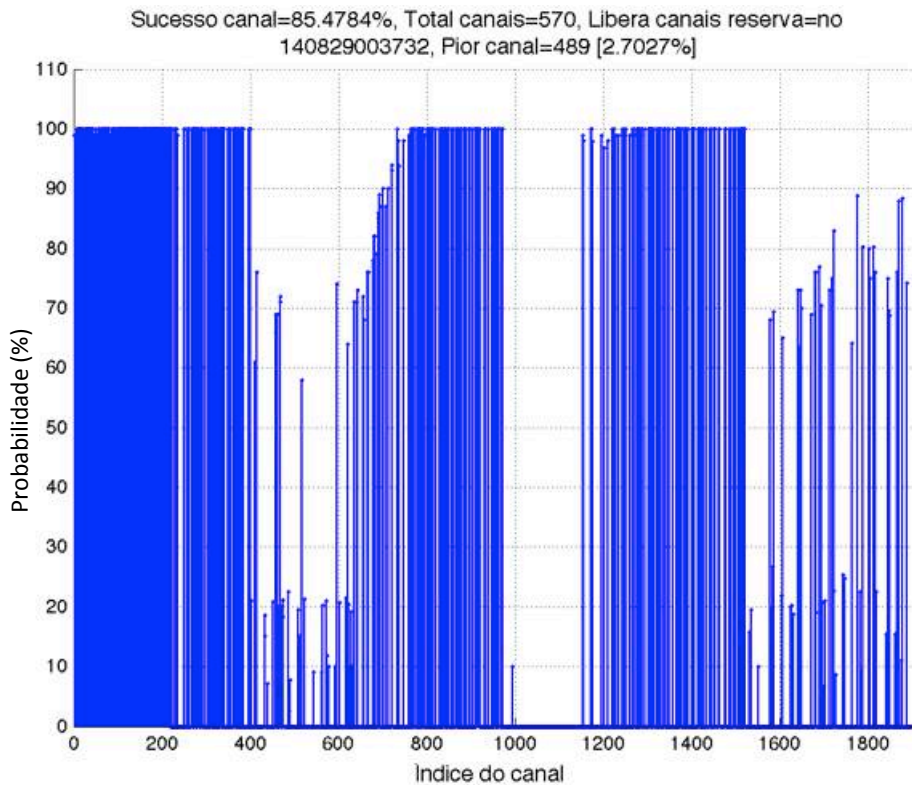


Figura I.5 - Cenário 5: resultados de simulação para análise de detecção de canal.

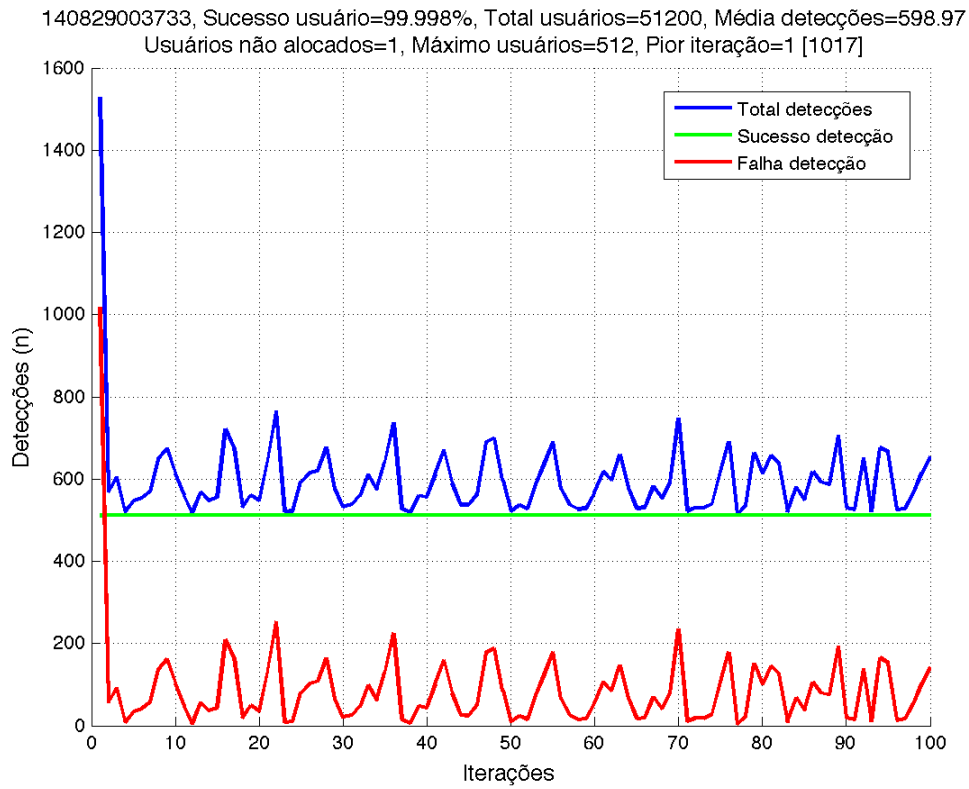
(a) Acesso aos canais.



(b) Probabilidade de sucesso dos canais.



(c) Detecções de canal.



(d) Probabilidade de detecção de canal.

