



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

Elvis Miguel Galeas Stancanelli

**APLICAÇÕES DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINAS
ÀS COMUNICAÇÕES MÓVEIS:**

GERENCIAMENTO DE RECURSOS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Fortaleza

2012

Elvis Miguel Galeas Stancanelli

**APLICAÇÕES DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINAS
ÀS COMUNICAÇÕES MÓVEIS:**

GERENCIAMENTO DE RECURSOS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Teleinformática. Área de concentração: Sinais e sistemas.

Orientador: prof. Dr. Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti

Coorientador: prof. Dr. Yuri Carvalho Barbosa Silva

Fortaleza

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- S788a Stancanelli, Elvis Miguel Galeas.
Aplicações de aprendizagem de máquinas às comunicações móveis: gerenciamento de recursos e avaliação de desempenho / Elvis Miguel Galeas Stancanelli – 2012.
150 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2012.
Área de Concentração: Sinais e sistemas.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti.
Coorientação: Prof. Dr. Yuri Carvalho Barbosa Silva.
1. Teleinformática. 2. Sistemas de comunicação móvel. 3. Simulação (Computadores). 4. Aprendizado do computador. I. Título.

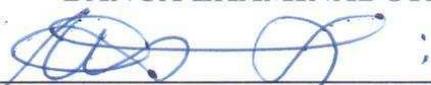
ELVIS MIGUEL GALEAS STANCANELLI

**APLICAÇÕES DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINAS ÀS COMUNICAÇÕES
MÓVEIS: GERENCIAMENTO DE RECURSOS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO**

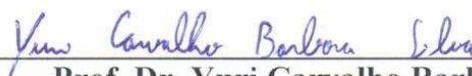
Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Teleinformática, área de concentração Sinais e Sistemas.

Aprovada em 04/09/2012.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Dr. Yuri Carvalho Barbosa Silva
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Dr. João Marcos Travassos Romano
Universidade de Campinas - Unicamp



Prof. Dr. Valdemar Cardoso da Rocha Junior
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e coragem concedidas ininterruptamente.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a concretização deste trabalho, ou ao menos torceram pelo seu sucesso. Orgulhosamente, há um grande número de pessoas a que sou grato, porém não tenho a pretensão de citar todas aqui. A algumas delas, no entanto, gostaria de expressar especial agradecimento.

Ao prof. Dr. F. Rodrigo P. Cavalcanti, por ter me proporcionado esta oportunidade e por ter me orientado nessa caminhada, em meio às muitas direções que surgiam e outras que desapareciam. Agradeço também por sua paciência e compreensão, qualidades apreciadas sempre que cronogramas não eram cumpridos como desejado. Obrigado pela confiança em mim depositada.

Ao prof. Dr. Yuri C. B. Silva, por ter acreditado neste projeto de doutorado, já em andamento, e atuado como coorientador. Agradeço pela minuciosa supervisão em várias das atividades desempenhadas no decorrer deste projeto, bem como pelas valiosas sugestões e discussões técnicas. Discussões estas foram cruciais para o amadurecimento do tema em uma esfera mais global.

Ao pesquisador Dr. Yngve Selén, da Ericsson AB, Suécia, pelas inúmeras e proveitosas discussões técnicas, sempre destacando questões desafiadoras. Agradeço por compartilhar sua vasta experiência no desenvolvimento de ferramentas de simulação de sistemas de comunicação comerciais, sem, no entanto, deixar de lado as discussões de cunho científico. Tack så mycket!

Gostaria ainda de expressar meus sinceros agradecimentos aos membros da banca do exame de qualificação: os já mencionados prof. Dr. F. Rodrigo P. Cavalcanti e Dr. Yngve Selén; os profs. da Universidade Federal do Ceará, Dr. Walter C. Freitas Jr. e Dr. Guilherme A. Barreto; e ao prof. da Universidade de São Paulo, Dr. Cristiano M. Panazio. Os vários apontamentos e questões levantados foram pertinentes e fundamentais para os passos que se seguiram. Em especial, agradeço ao prof. Dr. Walter C. Freitas Jr. pelas frequentes referências bibliográficas compartilhadas; sou grato ao Dr. Guilherme A. Barreto pelas aulas que valeram de subsídio para os tópicos de redes neurais artificiais e de agrupamento.

Não poderia deixar de agradecer a meus orientadores de outros tempos, mas cujos

ensinamentos carrego comigo até hoje. Ao prof. Taufik Abrão, da Universidade Estadual de Londrina, exemplo de dedicação à pesquisa, pelas primeiras (e empolgantes) aulas sobre comunicações móveis; pela orientação durante a conclusão do curso de graduação e pela motivação e acompanhamento durante o mestrado. Ao prof. Dr. Paul Jean Etienne Jeszensky, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelas proveitosas discussões técnicas, pelos valiosos conselhos, e, principalmente, pela brilhante orientação no mestrado.

À coordenação e à secretaria do programa de pós-graduação do DETI-UFC pelo apoio prestado ao longo de toda a minha passagem pelo doutorado.

Novamente ao prof. Dr. F. Rodrigo P. Cavalcanti, como coordenador do GTEL, por disponibilizar a moderna infraestrutura, incluindo o cluster computacional, de suma importância para a realização das muitas simulações.

Aos membros do GTEL, pelas constantes interações e ideias (quase sempre empolgantes) compartilhadas. Em especial, agradeço ao pesquisador Darlan C. Moreira pelas inúmeras assistências prestadas. Sou profundamente grato também ao prof. Dr. Tarcisio F. Maciel pela empolgação em discutir a qualquer momento qualquer assunto técnico e, sobretudo, seu esforço em sugerir melhorias. Agradeço também ao Dr. Ricardo Sousa, Universidade do Porto, Portugal, que em sua breve passagem pelo GTEL, promoveu discussões interessantes quanto a novas abordagens para o problema de aproximação de funções.

Aos membros do departamento de tecnologias de acesso por rádio (RAT) da Ericsson Research, de Estocolmo, pelo agradável período de convivência. Os muitos ensinamentos, sugestões e discussões foram extremamente enriquecedores.

À Ericsson Telecomunicações S.A., Brasil, pelo suporte dado mediante cooperação técnica e científica, em paralelo ao projeto de doutorado.

À CAPES junto à FUNCAP, pelo suporte financeiro no período inicial do doutorado.

Aos meus pais e irmãos, que se fizeram presentes mesmo a alguns milhares de quilômetros de distância. Pelo apoio e incentivo incondicionais, alheios às mais diversas intempéries.

À minha querida Alana, pelo seu constante encorajamento e compreensão, e principalmente, por seu carinho e doçura. Não posso deixar de agradecer à sua família, exemplo de harmonia, amizade e alegria.

RESUMO

De modo a suprirem o aumento de tráfego previsto para os próximos anos, os sistemas de comunicações móveis da próxima geração contam com tecnologias avançadas, como múltiplas subportadoras ortogonais e coordenação entre pontos de transmissão. Os recursos de rádio passam a ser organizados em um número maior de dimensões, tornando mais complexas tarefas como a alocação de recursos e a avaliação de desempenho do enlace. Com base em técnicas de aprendizagem de máquinas, foram investigadas novas maneiras de abordar essas tarefas, de modo a realizá-las eficientemente. Esta tese traz duas propostas: (i) agrupamento de pontos de transmissão e (ii) realização de interface enlace-a-sistema. Na proposta (i), utiliza-se o algoritmo k-médias para identificar os vetores de força do sinal similares, resultando em redução na complexidade de cooperação. Na proposta (ii), utilizam-se redes neurais artificiais para que o comportamento de simulações de enlace possa ser aprendido, resultando em uma interface enlace-a-sistema mais confiável para certas situações na região de borda de célula. Os resultados obtidos em ambas as propostas confirmam a aprendizagem de máquinas como abordagem apropriada aos problemas tratados, sendo capaz de conduzir a interpretações alternativas e soluções eficientes.

Palavras-chave: Sistemas de comunicação móvel. Aprendizagem de máquinas. Gerenciamento de recursos de rádio. Avaliação de desempenho. Simulação computacional.

ABSTRACT

In order to bear the growth in the traffic volume expected for the coming years, the next generation of mobile communication systems relies on advanced technologies such as multiple orthogonal subcarriers and coordination of multiple transmission points. The radio resources are organized in a higher number of dimensions, making resource allocation and assessment of link-level performance more complex tasks. Based on techniques from machine learning, we investigated novel ways of addressing these tasks in order to perform them efficiently. This thesis provides two proposals: (i) clustering of transmission points and (ii) design of a link-to-system interface. In proposal (i), the k-means algorithm is used to identify the strength signal vectors that are similar to each other, leading to a decrease on the cooperation complexity. In proposal (ii), we make use of artificial neural networks to learn the behavior of link-level simulations, resulting in a link-to-system interface more reliable for certain situations on the cell-edge region. The results obtained in both proposals confirm machine learning as an appropriate approach to the problems addressed, being able to lead to alternative interpretations and efficient solutions.

Keywords: Mobile communication systems. Machine learning. Radio resource management. Assessment of performance. Computer simulation.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Número de publicações por ano obtidas no levantamento inicial e no levantamento selecionado.	26
2.2	Número de publicações por ano obtidas no levantamento selecionado, separando-se os oito tópicos elencados e o tópico de rádio cognitivo. . .	27
3.1	Disposição das estações rádio base, doravante denominadas pontos de transmissão, na formação de uma célula CoMP.	30
3.2	Célula CoMP vista como um sistema MIMO macroscópico.	31
3.3	Modelo da célula CoMP e os vetores de força.	34
3.4	Modelo da célula CoMP adotado com K grupos formados.	39
3.5	Complexidade computacional relativa em função do número de grupos.	41
3.6	Célula CoMP de um sistema CoMP hipotético com cinco PTs e dois EUs.	45
3.7	Célula CoMP de um sistema CoMP hipotético com cinco PTs e seis EUs.	46
3.8	Formação de três grupos na célula CoMP de um sistema CoMP hipotético.	48
3.9	Diagrama de sequência do uso do algoritmo de assinalamento baseado no algoritmo k-médias.	55
3.10	Quantidade de sinalização relativa em função do número de grupos, dado $\psi = JM$	56
3.11	Quantidade de sinalização relativa em função do número de grupos, dado $\psi = JM/4$	57
3.12	Sistema composto por sete células CoMP.	59
3.13	Configuração de três grupos estáticos tomada como referência.	60
3.14	Eficiência espectral sistêmica para algumas configurações de agrupamento, com seleção plena ou parcial, sendo esta última realizada de maneira aleatória.	61

3.15	Eficiência espectral sistêmica de agrupamento realizado de maneira estática e dinâmica. Consideraram-se algumas configurações de agrupamento, partindo de 3 grupos com seleção plena ou parcial, sendo esta última realizada de maneira aleatória.	63
3.16	Ocorrências de cada PT em cada um dos 3 grupos (seleção plena).	65
3.17	Relação das composições predominantes dos três grupos com os índices de PTs para 60% das observações; os setores em branco referem-se aos PT remanescentes.	65
3.18	Eficiência espectral sistêmica para diferentes configurações de agrupamento e de LCA.	67
3.19	Eficiência espectral sistêmica versus LCA para diferentes configurações de agrupamento dada uma carga oferecida de 6 EUs por setor.	68
4.1	Algumas funcionalidades típicas envolvidas por uma ferramenta de simulação computacional de uma rede celular.	72
4.2	Destaque do papel da ferramenta LL no contexto do sistema.	73
4.3	Exemplo do mecanismo ARQ híbrido sendo inserido na ferramenta (a) LL ou (b) SL.	76
4.4	Exemplo com o módulo do desvanecimento de curto prazo sendo inserido na ferramenta LL e na SL.	77
4.5	Grupo de 19 células tri-setorizadas, com a ERB 4 sendo a sERB. As demais ERBs exercem os papéis de primeiro e segundo anéis interferentes.	81
4.6	Usuário atravessando em linha reta o primeiro setor da sERB; a seta tracejada indica o sentido do movimento.	83
4.7	Amostras das FSRs provenientes das iERBs capturadas ao longo do deslocamento de um usuário, normalizadas pela FSR proveniente do primeiro setor de sERB, para os padrões de radiação de antena transmissora (a) puramente horizontal e (b) vertical-horizontal.	85
4.8	Cenário com um único iERB transmitindo através de modulação 16-QAM, enquanto a sERB emprega QPSK. O quadrado representa detecção correta, enquanto o símbolo x representa a detecção errônea.	86

4.9	16-QAM retangular e os três círculos relacionados aos níveis quantizados de interferência.	87
4.10	RBEP para transmissão através da modulação QPSK em cenários puramente interferentes com diferentes números de iERBs usando a mesma modulação com mesma potência. Para simplicidade de análise, o canal de rádio é desprezado.	88
4.11	RBEP para transmissão através de modulação QPSK diante de cenários puramente interferentes com 1, 2, 3, ou 20 iERBs, todas transmitindo com mesma modulação BPSK e potência.	90
4.12	RBEP para transmissão através de modulação QPSK diante de cenários puramente interferentes com 1, 2, 3, ou 20 iERBs, todas transmitindo com mesma modulação 64-QAM e potência.	91
4.13	Princípio do mapeamento ESM para interface L2S.	91
4.14	A relação entre as medidas γ_{eff} e BLEP estabelecidas pela interface EESM L2S e curva de mapeamento de qualidade.	93
4.15	Comportamento da interface baseada no mapeamento EESM diante de condição adversa, na qual há dois possíveis níveis para a potência interferente diferenciados pelo uso dos marcadores preenchidos e vazios.	96
4.16	A interface L2S vista como um problema básico de identificação de planta.	97
4.17	Modelo do combinador linear adaptativo (CLA) [Widrow & Lehr 1990].	99
4.18	O esquema básico de uma nL2Si.	102
4.19	Cenário de simulação considerando um único EU sob a influência de duas ERBs dominantes independentes – uma sERB e uma iERB –, bem como os principais elementos das cadeias de transmissão e recepção.	106
4.20	Organização dos índices referentes aos instantes de tempo em subconjuntos de construção, validação e teste das interfaces L2S EESM e nL2Si em regime misto.	109
4.21	Séries dos valores de BLEP para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0$ dB.	112

-
- 4.22 EQM em função do valor de β para calibração da interface EESM individualmente para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0 \text{ dB}$ 113
- 4.23 Gráficos de dispersão e curvas artificiais obtidas para a interface EESM com os valores ótimos de β individualmente para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0 \text{ dB}$ 114
- 4.24 Resultados de predição obtidos através da interface L2S EESM, dos valores de BLEP para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0 \text{ dB}$ 115
- 4.25 Resultados de predição obtidos através da interface nL2Si baseada no CLA, dos valores de BLEP para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0 \text{ dB}$ 116
- 4.26 Resultados de predição obtidos através da interface nL2Si baseada na rede MLP, dos valores de BLEP para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0 \text{ dB}$ 119
- 4.27 Séries dos valores de BLEP para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = -3 \text{ dB}$ 120
- 4.28 Valores de BLEP obtidos de extensas simulações de enlace em regime misto. 121
- 4.29 (Topo) EQM em função do valor de β para calibração da interface EESM e (abaixo) curvas artificiais obtidas para o melhor ajuste de β em cada um dos graus para o regime de operação misto com $SINR = -3 \text{ dB}$ 122
- 4.30 EQM de treino e de validação para a interface nL2Si, baseada no CLA (topo), na rede MLP com uma camada oculta (meio) e com duas camadas ocultas (abaixo), para o regime de operação misto com $SINR = -3 \text{ dB}$ 127
- 4.31 Resultados de predição obtidos através da interface EESM para o regime de operação misto com $SINR = -3 \text{ dB}$: no canto superior, para a interface baseada na EESM com calibração realizada com polinômio de 1º grau e, no canto inferior, 6º grau. 128

-
- 4.32 Resultados de predição obtidos através das várias interfaces nL2Si para o regime de operação misto com $SINR = -3 \text{ dB}$: no canto superior, para a interface baseada no CLA; no meio, para a interface baseada na rede MLP com uma camada oculta, e, no canto inferior, para a interface baseada na rede MLP com duas camadas ocultas. 129
- 4.33 Gráficos de dispersão da interface EESM para os três regimes de operação individuais: (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = -3 \text{ dB}$ 130
- 4.34 Função distribuição cumulativa dos valores absolutos dos erros de predição causados pela interface L2S: EESM e nL2Si-MLP. 131
- 4.35 Histograma dos erros quadráticos de predição da interface *link-to-system level* (L2S) proporcionados pela EESM e nL2Si-MLP sobre quatro realizações independentes do canal; o nível de confiança dos resultados é de 90%. 131

LISTA DE TABELAS

2.1	Indicação das máquinas adaptativas empregadas nas publicações selecionadas nos tópicos apresentados na seção 2.2.	28
3.1	Modelos adotados para as componentes do ganho do canal.	59
3.2	Interferência total média sofrida pelo sistema para uma carga oferecida fixa de EUs por setor, considerando algumas configurações de agrupamento, com seleção plena ou parcial, sendo esta última realizada de maneira aleatória.	62
4.1	Perfil atraso-potência canal veicular 'B' do ITU [ITU 1997].	107
4.2	Configurações dos três regimes para diferentes valores médios de $SINR$ avaliados.	108
4.3	Métricas de desempenho para as interfaces L2S testadas – EESM, nL2Si-CLA e nL2Si-MLP – individualmente para os regimes PIN0, PIN1 e PIN2 a um valor médio de $SINR = 0 \text{ dB}$	117
4.4	Métricas de desempenho para as interfaces L2S testadas – EESM, nL2Si-CLA e nL2Si-MLP – individualmente para os regimes PIN0, PIN1 e PIN2 a um valor médio de $SINR = -3 \text{ dB}$	118
4.5	Métricas de desempenho para as interfaces nL2Si-MLP – considerando todas as subportadoras como entrada, uma a cada 12 e uma a cada 64 – testada individualmente para os regimes PIN0, PIN1 e PIN2 a um valor médio de $SINR = -3 \text{ dB}$	118
4.6	Métricas de desempenho para as interfaces L2S testadas – EESM, nL2Si-CLA e nL2Si-MLP, em suas várias versões – para o regime misto de operação a um valor médio de $SINR = -3 \text{ dB}$	123
4.7	Número de ocorrência de falhas graves para diferentes campanhas de simulação de dois cenários principais, em que 0,4 é o limiar de classificação das falhas.	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2G	segunda geração
3G	terceira geração
3GPP	<i>3rd. Generation Partnership Project</i>
4G	quarta geração
ARQ	<i>automatic repeat request</i>
AWGN	<i>additive white Gaussian noise</i>
BER	<i>bit error rate</i>
BLEP	<i>block error probability</i>
BLER	<i>block error rate</i>
BPSK	<i>binary phase-shift keying</i>
CDMA	<i>code-division multiple access</i>
CLA	combinador linear adaptativo
CoMP	<i>coordinated multipoint</i>
CRC	<i>cyclic redundancy check</i>
CSI	<i>channel state information</i>
EAMH	erro absoluto – média harmônica
EESM	<i>exponential ESM</i>
EQM	erro quadrático médio
ERB	estação rádio base
ESM	<i>effective SINR mapping</i>
EU	equipamento de usuário
FDD	<i>frequency division duplex</i>
FSR	<i>força do sinal recebido</i>
GMSK	<i>Gaussian minimum shift keying</i>

GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRR	gerenciamento dos recursos de rádio
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
ICA	<i>independent component analysis</i>
iERB	estação rádio base interferente
INR	<i>interference-to-noise ratio</i>
ISR	<i>interference-to-signal ratio</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
KPI	<i>key performance indicator</i>
kVP	k vizinhos mais próximos
L2S	<i>link-to-system level</i>
LCA	limitação do conjunto ativo dos pontos de transmissão
LL	<i>link-level</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution - Advanced</i>
MAC	<i>medium access control</i>
MCS	<i>modulation and coding scheme</i>
MIESM	<i>mutual-information ESM</i>
MIMO	<i>multiple input multiple output</i>
MLP	<i>multilayer perceptron</i>
MMSE	<i>minimum mean square error</i>
MOS	<i>mean opinion score</i>
MU	multiusuário
MUSIC	<i>multiple signal classification</i>
nL2Si	<i>neural link-to-system interface</i>
OFDM	<i>orthogonal frequency division multiplexing</i>
OFDMA	<i>orthogonal frequency division multiple access</i>
OFG	ocorrência de falhas graves
PINO	potência interferente nula

PIN1	potência interferente de primeiro nível
PIN2	potência interferente de segundo nível
PRB	<i>physical resource block</i>
PT	ponto de transmissão
QAM	<i>quadrature amplitude modulation</i>
QoS	<i>quality of service</i>
QPSK	<i>quadrature phase-shift keying</i>
QV	quantização vetorial
RBEP	<i>raw bit error probability</i>
RBF	<i>radial basis function</i>
RBIR	<i>received bit information rate</i>
RNA	rede neural artificial
SEP	<i>symbol error probability</i>
sERB	estação rádio base servidora
SIC	sinal interferente combinado
SINR	<i>signal-to-interference plus noise ratio</i>
SL	<i>system-level</i>
SNR	<i>signal-to-noise ratio</i>
SOM	<i>self-organizing map</i>
SVM	<i>support vector machine</i>
SVR	<i>support vector regression</i>
TDD	<i>time division duplex</i>
TTI	<i>transmission time interval</i>
UCP	unidade central de processamento
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VoIP	<i>voice over internet protocol</i>
ZF	<i>zero-forcing</i>
WCL	<i>weighted centroid localization</i>

NOTAÇÃO

- letras em itálico para escalares. Ex.: x ;
- letras minúsculas em negrito para vetores. Ex.: \mathbf{x} ;
- letras maiúsculas em negrito para matrizes. Ex.: \mathbf{X} ;
- letras caligráficas para conjuntos. Ex.: \mathcal{X} ;
- $\mathbb{C}^{m \times n}$ denota espaço vetorial das matrizes de ordem $m \times n$ cujos elementos são números complexos;
- $\mathbb{R}^{m \times n}$ denota espaço vetorial das matrizes de ordem $m \times n$ cujos elementos são números reais;
- $\mathbb{R}_+^{m \times n}$ denota espaço vetorial das matrizes de ordem $m \times n$ cujos elementos são números reais não negativos;
- v_j denota o j -ésimo elemento do vetor \mathbf{v} ;
- $m_{i,j}$ denota o elemento à i -ésima linha e j -ésima coluna da matriz \mathbf{M} ;
- $|\cdot|$ denota valor absoluto de escalar ou cardinalidade de conjunto;
- $\|\cdot\|$ denota norma euclidiana;
- $\langle \cdot, \cdot \rangle$ denota par de elementos;
- $(\cdot)^T$ denota transposição de matriz.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Problemática	3
1.2	Motivação	4
1.3	Objetivos	5
1.4	Contribuições	5
1.5	Produção Técnica e Científica	7
1.5.1	Artigos Científicos	7
1.5.2	Capítulo de Livro	8
1.5.3	Patente	8
1.6	Sinopse dos Capítulos	8
2	Aplicações da Aprendizagem de Máquinas em Sistemas de Comunicações Móveis	10
2.1	Critérios	11
2.2	Tópicos sobre Comunicações Móveis	12
2.2.1	Gerenciamento de Recursos de Rádio	12
2.2.2	Adaptação da Transmissão	15
2.2.3	Projeto de Arranjo de Antenas	16
2.2.4	Receptores	18
2.2.5	Predição da Propagação	19
2.2.6	Análise de Tráfego	20
2.2.7	Provisão e Rastreamento da Mobilidade	21

2.2.8	Operação e Planejamento da Rede	23
2.3	Análise Bibliográfica	24
2.4	Considerações Finais	26
3	Assinalamento de Enlaces em Células CoMP através do Método do Agrupamento	29
3.1	Modelagem do Sistema CoMP	32
3.1.1	Multiplexação espacial	35
3.2	Agrupamento dos Múltiplos Pontos	38
3.2.1	Complexidade de coordenação	38
3.2.2	Taxa agregada	42
3.3	Abordagens Existentes	43
3.4	Proposta de um Novo Método de Agrupamento dos Múltiplos Pontos .	44
3.4.1	Método de agrupamento auto-organizado	48
3.4.2	Algoritmo de assinalamento baseado em k-médias	52
3.4.3	Obtenção do conjunto \mathcal{V} e reportes	54
3.4.4	Quantidade relativa de sinalização	55
3.5	Simulação Computacional	57
3.5.1	Cenário	58
3.5.2	Resultados de eficiência espectral	60
3.6	Considerações Finais	66
4	Avaliação de Desempenho do Enlace de Sistemas de Comunicação Móveis através de Redes Neurais	69
4.1	Avaliação de Desempenho	70
4.1.1	Organização dos Níveis de Simulação	74
4.1.2	Sumarização	78
4.2	Alguns Aspectos de um Cenário Interferente	80

4.3	Mapeamento da SINR Efetiva	89
4.3.1	EESM diante de condições adversas	95
4.4	Abordagem neural para interface L2S	97
4.4.1	Combinador Linear Adaptativo	99
4.4.2	Multilayer Perceptron	100
4.4.3	Metodologia de construção dos modelos	103
4.5	Simulação Computacional	105
4.5.1	Cenários	106
4.5.2	Metodologia de Avaliação das Interfaces	109
4.5.3	Resultados	110
4.6	Considerações Finais	125
5	Conclusão	132
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	134
6	Atualização de Pesos Sinápticos pelo Algoritmo de Retropropagação	136
	Referências Bibliográficas	138

1 INTRODUÇÃO

INCONTESTAVELMENTE a tecnologia das comunicações móveis está entranhada aos hábitos hodiernos. No início, a disponibilização de serviço telefônico em qualquer lugar a qualquer momento foi o grande desafio lançado, o qual, à medida que foi se tornando uma realidade concreta, mostrou-se também ser o maior propulsor de seu sucesso. Esse novo mercado assumiu proporções gigantescas. Já no início da década em curso, o número de assinantes das redes celulares ultrapassou os 5 bilhões em termos globais, sendo 200 milhões destes no Brasil [ITU 2012]. Esses números mantêm-se em pleno crescimento, apontando constantemente novos avanços, tão empolgantes quanto desafiadores.

Em meio ao provimento do serviço de voz, a comunicação de dados foi tomando seu espaço já durante a segunda geração (2G) das redes celulares. No entanto, somente em sua terceira geração (3G) é que foi possível alcançar taxas de transmissão mais condizentes com os anseios dos usuários desse tipo de serviço. Graças à incessante e profunda evolução das redes celulares, seu desafio inicial pôde ser generalizado: prover a conectividade de serviço multimídia, para uma ou várias pessoas ou máquinas, a qualquer momento e em qualquer lugar.

Entretanto, a principal dificuldade para a conquista desse desafio esbarra no fato de que o volume de tráfego tem aumentado muito rapidamente. Extrapolações das tendências mostram que, ao longo da década em curso, o volume de tráfego deve aumentar em cerca de mil vezes, sendo dez vezes de aumento dos usuários da banda larga móvel e cem vezes de aumento no tráfego por usuário [Nokia Siemens Networks 2011]. As tecnologias de acesso por rádio têm sido aprimoradas para satisfazer o conjunto de requisitos estabelecidos pela organização *International Telecommunication Union* (ITU). Têm sido requeridas novas abordagens para o projeto da camada física e das tecnologias de múltiplo acesso, bem como do controle do enlace de rádio, em sistemas emergentes, ditos de quarta geração ou 4G [Khan et al. 2009, Plumb 2012, Nokia Siemens Networks 2012]. Neste contexto, o *3rd. Generation Partnership Project*

(3GPP) aposta em evoluções das redes celulares, como o LTE e o LTE-A, as quais adotam tecnologias como *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM), *multiple input multiple output* (MIMO) e *coordinated multipoint* (CoMP). Por sua vez, os sistemas tornam-se cada vez mais complexos e difíceis de serem modelados.

Nesta tese, investiga-se a aplicação de técnicas de aprendizagem de máquinas como ferramenta de auxílio à modelagem e exploração desses sistemas emergentes. Conhecimento sobre o ambiente é adquirido por meio do aprendizado, armazenado e disponibilizado para o uso posterior [Haykin 2008]. Há diferentes maneiras de promover o aprendizado da máquina, sendo o aprendizado supervisionado uma das fundamentais, no qual presume-se a existência de um tutor conhecedor de um conjunto de exemplos de pares entrada-saída, supostamente, relevantes. Em contraste, há também o aprendizado não supervisionado, caracterizado principalmente pela ausência desse tutor, podendo, de acordo com Haykin (2008), ser subdividido em aprendizado auto-organizado e aprendizado por reforço. No aprendizado auto-organizado, ajustam-se os parâmetros livres de um modelo, usualmente com base em regras competitivas, de modo a otimizar uma dada medida de qualidade. O aprendizado por reforço é realizado por meio de um processo contínuo de interação entre a máquina e seu ambiente, buscando atingir objetivos específicos descritos por meio de um índice de desempenho.

A aprendizagem de máquinas tem estado cada vez mais presente nas novas tecnologias, tais como no auxílio de mecanismos de busca na *internet*, nos sistemas utilizados no comércio eletrônico para a recomendação personalizada de novos produtos e na navegação autônoma de veículos, dentre muitas outras aplicações apontadas, por exemplo, em Alpaydin (2010).

Com base nas diversas aplicações bem-sucedidas das técnicas de aprendizagem de máquinas, acredita-se que: *A aplicação da aprendizagem de máquinas a problemas de comunicações móveis pode prover interpretação alternativa e solução eficiente em comparação a abordagens clássicas.* Trata-se da hipótese aqui lançada, a qual é muito ampla para que possa ser aceita ou rejeitada de maneira absoluta. Em vista disso, ao longo do texto, além de apresentar uma variedade de trabalhos já publicados que podem ser dispostos em torno dessa hipótese, atacaram-se dois subproblemas específicos e bastante diferentes para testá-la: o gerenciamento de recursos de rádio e avaliação de desempenho através de simulações. Enquanto o subproblema de gerenciamento de recursos de rádio foi atacado através de aprendizado auto-organizado, a avaliação de

desempenho foi auxiliada pelo aprendizado supervisionado.

O restante deste capítulo divide-se em seis seções. A seção 1.1 traz uma breve descrição dos subproblemas atacados ao longo desta tese. A seção 1.2 apresenta os principais aspectos da motivação deste trabalho e a seção 1.3 apresenta os objetivos perseguidos durante o desenvolvimento do projeto de tese. Na seção 1.4, destacam-se quais as contribuições provenientes desta tese. A seção 1.5 lista a produção científica e técnica gerada junto ao desenvolvimento do projeto de tese. Por fim, na seção 1.6, descreve-se brevemente a organização dos próximos capítulos.

1.1 Problemática

A inserção de novas dimensões, tais como frequência e espaço, a problemas já estudados das comunicações móveis, implica revisitar as abordagens até então consolidadas. Diversidade e/ou multiplexação espaciais aumentam as possibilidades de estabelecer as transmissões [Liu et al. 2012], bem como, mecanismos como adaptação de enlace e escalonamento passam a lidar com recursos de rádio dispostos em uma grade tempo-frequência [Pedersen et al. 2009]. Ademais, novas maneiras de explorar os recursos de rádio têm surgido, tais como a cooperação entre estações rádio base (ERBs) e o uso de repetidores [Raychaudhuri & Mandayam 2012, Bai et al. 2012, Baker 2012, Lee et al. 2012], incentivando o desenvolvimento de algoritmos de gerenciamento de recursos mais aprimorados.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, a tecnologia CoMP (do inglês, *coordinated multipoint*) entrou em evidência, a qual promove a transmissão conjunta a partir de diversas antenas ou ERBs geograficamente distribuídas¹. Todavia, devido a questões práticas como, por exemplo, limitação no *backhaul*, nem sempre é possível ou apropriado lidar com todos esses pontos de transmissão simultaneamente. Dependendo das restrições de sinalização e complexidade computacional do sistema, talvez seja mais apropriado estabelecer a coordenação apenas entre parte desses pontos de transmissão. Entretanto, os métodos conhecidos (e.g. [Papadogiannis et al. 2008, Papadogiannis & Alexandropoulos 2010]) que agrupam diretamente os pontos de transmissão recaem em uma complexidade computacional crítica para sua adoção em tempo real. O desenvolvimento de métodos mais simples torna-se desejado, consistindo no primeiro subproblema atacado nesta tese.

¹Uma descrição detalhada sobre a tecnologia CoMP é apresentada no Capítulo 3.

A complexidade dessas novas tecnologias também se reflete na metodologia de avaliação do desempenho dos sistemas. São muitos os elementos envolvidos no sistema bem como os tipos de interações que podem ser desenvolvidas, dificultando a construção de modelos para suportar uma análise teórica do desempenho. Alheia a muitas das dificuldades analíticas, a simulação computacional tem sido o método mais largamente difundido para esse tipo de avaliação. No entanto, a interface que separa funcionalidades de enlace das funcionalidades sistêmicas está sujeita a perdas de informação, uma vez que invariavelmente algum tipo de sumarização da informação trocada entre esses níveis de funcionalidade se faz presente (e.g. [Holma 2003, Brueninghaus et al. 2005]). Preservar ao máximo a dimensionalidade natural do problema passa a ser desejado, mas a melhor maneira de como aproveitá-la ainda é uma questão em aberto. Neste trabalho, enfoca-se a sumarização oriunda do tratamento da parcela interferente tal como a de ruído térmico dispensado pelas interfaces enlace-a-sistema L2S (do inglês, *link-to-system level*) clássicas. Trata-se do segundo subproblema atacado.

Esses dois subproblemas são discutidos em profundidade e separadamente nos Capítulos 3 e 4.

1.2 Motivação

A dificuldade imposta em decorrência da evolução das redes celulares se destaca, primeiramente, pelo aumento na dimensionalidade. Por exemplo, investigações acerca de algoritmo de alocação de potência em um sistema LTE com MIMO, podem conduzir a um espaço de soluções de cinco dimensões: tempo, frequência, espaço, usuário e potência. Outra dificuldade imposta se refere à avaliação de desempenho. Além do significativo número de variáveis que passa a reger alguns modelos, as entidades envolvidas são tipicamente complexas, envolvendo mecanismos como a codificação turbo e a combinação de retransmissões. Desse modo, em alguns casos, torna-se difícil estabelecer uma relação concisa entre variáveis de entrada e de saída.

A aprendizagem de máquinas desponta como uma abordagem atraente para tratar esses problemas, permitindo a construção de modelos não de maneira explícita, mas sim com base em experiência passada disponibilizada na forma de dados [Alpaydin 2010]. Paralelo a isso, com o avanço na tecnologia dos computadores, alcançou-se a capacidade de armazenar e processar uma enorme quantidade de dados, se

comparada à habilidade humana. Através da aprendizagem, acredita-se existir um processo ou tarefa que explique os dados observados. Mesmo não sendo possível identificar completamente um processo ou tarefa, as técnicas de aprendizagem de máquinas permitem a construção de um modelo útil, pela detecção de certos padrões e regularidades [Alpaydin 2010]. Por meio de sua capacidade de generalização fora de amostra, a aprendizagem de máquinas permite uma satisfatória ação mesmo para entradas não contempladas durante seu treinamento.

1.3 Objetivos

Nesta tese, propõe-se aplicação de máquinas adaptativas para resolver alguns problemas de sistemas de comunicações móveis. *Máquina adaptativa* é um termo amplamente empregado ao longo do texto, referindo-se à técnica de aprendizagem de máquinas propriamente dita. Partindo dessa nova perspectiva proporcionada pela aprendizagem de máquinas, o objetivo principal consiste em desvendar soluções inovadoras, que se mostrem atraentes, seja pela simplicidade, seja pela exatidão. Acompanhando a descrição dos subproblemas realizada anteriormente, os objetivos específicos também se desdobram em dois:

- estudar e aplicar uma máquina adaptativa que possibilite o agrupamento dos pontos de transmissão de um sistema CoMP de maneira relativamente simples;
- estudar e aplicar uma máquina adaptativa que realize a tarefa equivalente das interfaces L2S, de maneira eficiente, preservando a independência da parcela interferente.

Entretanto, esta tese não se propõe a contribuir diretamente à teoria de aprendizagem de máquinas. A escolha das máquinas adaptativas e dos algoritmos de aprendizagem limita-se a opções clássicas e bem consolidadas.

1.4 Contribuições

Podemos destacar as principais contribuições em dois níveis de enfoque: geral e específico. No nível geral, destaca-se o levantamento bibliográfico sobre aplicações de máquinas adaptativas em problemas de comunicações móveis. Uma vasta pesquisa

bibliográfica foi realizada cobrindo os diversos assuntos vinculados a sistema de comunicações móveis² que já tenham sido tratados por meio da aprendizagem de máquinas. Daí gerou-se uma classificação dos principais tipos de aplicações de acordo com tópicos conhecidos nas comunicações móveis, revelando a maneira como problemas clássicos podem ser revistos. A pesquisa bibliográfica focou-se em publicações em periódicos conceituados, portanto, restringindo os resultados àqueles trabalhos mais relevantes do ponto de vista do impacto científico. Ainda assim, foram várias as classes de aplicações encontradas, indo desde o projeto de receptores até a operação de redes. Desse modo, algumas linhas de investigação bem-sucedidas são colocadas como referência para novas aplicações. Notar que cada uma das publicações elencadas funciona como um teste para a hipótese geral levantada na seção 1.2.

Mesmo com a vasta gama de problemas de redes sem fio móveis infraestruturadas conhecidamente atacados por meio de técnicas de aprendizagem de máquinas, até onde sabemos, os dois subproblemas aqui destacados nunca foram lidados através dessa abordagem. Tratam-se do agrupamento de pontos de transmissão e a realização da interface enlace-a-sistema L2S. O subproblema de agrupamento de pontos de transmissão pode ser associado a um dos tópicos destacados durante o levantamento bibliográfico em questão, o gerenciamento dos recursos de rádio (GRR). Já a realização da interface L2S não pode ser associada a nenhum dos tópicos destacados, dando causa à criação de uma classe própria de aplicação: a avaliação de desempenho. Neste ponto destacam-se as principais contribuições específicas: *agrupamento de pontos de transmissão com base no algoritmo k-médias* e *realização da interface enlace-a-sistema L2S através redes neurais*. Na primeira aplicação, faz-se uso do aprendizado auto-organizado dentro do tempo de execução, i.e. *online*; ao passo que que na segunda aplicação, o aprendizado supervisionado é realizado fora do tempo de execução, i.e. *offline*.

Agrupamento de pontos de transmissão com base no algoritmo k-médias: Propõe-se realizar o agrupamento dos pontos de transmissão de maneira indireta, em contraste ao agrupamento direto realizado pelas soluções conhecidas. Partindo do agrupamento dos vetores de força dos sinais, o qual é realizado com base no algoritmo k-médias, promove-se o agrupamento dos equipamentos de usuários (EUs) e dos pontos de transmissão (PTs) de maneira computacionalmente mais simples do que algoritmos gananciosos disponíveis na literatura especializada.

Realização da interface enlace-a-sistema L2S através redes neurais: Com foco em um

²Devido à diversidade de sistemas de comunicações móveis, a pesquisa bibliográfica limitou-se às redes sem fio móveis infraestruturadas, com vistas às redes de telefonia móvel celulares.

sistema sem fio com múltiplas dimensões de sinal, propõe-se uma interface L2S que, diferentemente das abordagens clássicas, seja sensível a variações na proporção de potência de ruído térmico e de interferência. Essa interface inovadora é realizada a com base na redes neurais artificiais (RNAs) como ferramenta de aproximação de função. Essa nova abordagem tende a melhorar a confiabilidade da avaliação de desempenho do enlace, sobretudo, para usuários à borda da célula.

1.5 Produção Técnica e Científica

Ao longo do desenvolvimento deste projeto de doutorado, geraram-se produtos técnicos e científicos. A seguir a produção relacionada aos estudos realizados para o doutorado está organizada em artigos científicos, capítulo de livro e patente.

1.5.1 Artigos Científicos

E. M. G. Stancanelli, J. M. S. Maciel, C. A. de Araújo, C. H. M. de Lima, E. B. Rodrigues & F. R. P. Cavalcanti, *On the Modeling and Evaluation of the Physical Layer of HSPA Uplink*, SBrT-07 - XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Recife, Brasil, Setembro de 2.007.

R. B. Santos, W. C. Freitas Jr., **E. M. G. Stancanelli** & F. R. P. Cavalcanti, *Link-to-System Level Interface Solutions in Multistate Channels for 3GPP LTE Wireless System*, SBrT-07 - XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Recife, Brasil, Setembro de 2.007.

T. F. Maciel, **E. M. G. Stancanelli**, J. C. M. Feitosa, W. C. Freitas & F. R. P. Cavalcanti, *Scheduling Strategies for Coordinated Multi-Point Systems*, SBrT-09 – XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Blumenau, Brasil, Outubro de 2.009.

E. M. G. Stancanelli, F. R. P. Cavalcanti & Y. C. B. Silva, *Revisiting the Effective SINR Mapping Interface for Link and System Level Simulations of Wireless Communication Systems*, IEEE LATINCOM, Belém, Brasil, Outubro de 2.011.

R. L. Batista, Y. C. B. Silva, **E. M. G. Stancanelli** & F. R. P. Cavalcanti, *Radio Resource Allocation Strategies for Multi-antenna CoMP Systems*, ISWCS, IX International Symposium on Wireless Communication Systems, Paris, França, Agosto de 2.012.

E. M. G. Stancanelli, T. F. Maciel, Y. C. B. Silva, W. C. Freitas & F. R. P. Cavalcanti, *Application of Dynamic Clustering into CoMP Systems*, SBrT-12, XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Brasília, Brasil, Setembro de 2.012. (no prelo)

R. L. Batista, Y. C. B. Silva, **E. M. G. Stancanelli** & F. R. P. Cavalcanti, *Interference management and antenna downtilt in multi-antenna CoMP systems*, SBrT-12, XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Brasília, Brasil, Setembro de 2.012. (no prelo)

1.5.2 Capítulo de Livro

E. M. G. Stancanelli, C. H. M. de Lima & D. C. Moreira, *Strategies for Link-level Performance Assessment in the Simulation of Wireless Systems*, In: *Optimizing Wireless Communication Systems*. Eds.: F. R. P. Cavalcanti & S. Andersson, ISBN 978-1-4419-0154-5, Springer, 2.009.

1.5.3 Patente

E. M. G. Stancanelli, T. F. Maciel, Y. C. B. Silva, W. C. Freitas & F. R. P. Cavalcanti, Pedido Provisório de Patente, número 61/621.647, *Dynamic Clustering Method for Coordinated Transmission in Wireless Communication Systems*, E.U.A., Abril de 2.012.

E. M. G. Stancanelli, T. F. Maciel, Y. C. B. Silva, W. C. Freitas & F. R. P. Cavalcanti, Pedido de Patente, número 13/482.118, *Dynamic Clustering for Coordinated Transmission in Wireless Communication Systems*, E.U.A., Maio de 2.012.

1.6 Sinopse dos Capítulos

O restante da tese é organizado em quatro outros capítulos:

Capítulo 2 traz um levantamento bibliográfico atual acerca da aplicação de

aprendizagem de máquinas, em sua vastidão de representantes, às redes sem fio. Os problemas de comunicação sem fio foram classificados em tópicos identificados como os mais representativos. Por último, as máquinas adaptativas mais demandadas foram destacadas;

Capítulo 3 trata do problema de agrupamento de PTs, pertinente às futuras gerações das redes celulares baseadas na tecnologia CoMP. Uma solução inovadora, embasada no clássico algoritmo k-médias, é proposta para resolver o problema com foco na complexidade de coordenação dos PTs;

Capítulo 4 discorre sobre a avaliação de desempenho por meio de simulação computacional, destacando-se a interface enlace-a-sistema L2S, a qual se trata de uma questão recorrente às pesquisas baseadas em complexos simuladores sistêmicos. Os cenários interferentes típicos para sistemas OFDM são colocados como adversidades às soluções clássicas de interface. Para enfrentar essas adversidades, propõe-se uma interface baseada em RNA. A proposta é apresentada e avaliada através de simulações computacionais;

Capítulo 5 discute os principais pontos relevantes levantados em cada um dos capítulos que o antecedem, traçando uma conclusão geral. Além do mais, discursa-se sobre as principais extensões e trabalhos futuros pertinentes a cada uma das contribuições.

Cada um dos capítulos de 2 a 4 está relacionado a cada uma das contribuições descritas na seção 1.4, desse modo, preservando um alto grau de independência de cada uma das matérias. As inter-relações entre esses capítulos são deixadas tão somente a este capítulo 1, introdutório, bem como para o capítulo 5, conclusivo. Enquanto o capítulo 2 tem uma abordagem ampla focada em percepções gerais e comparativas, os capítulos 3 e 4 lidam em profundidade com subproblemas bem delimitados e específicos.

Por último, um único apêndice completa o texto. Esse apêndice auxilia no desenvolvimento de algumas expressões do algoritmo de retropropagação consideradas para a implementação do algoritmo de atualização dos pesos da rede *multilayer perceptron* (MLP) descrita no *Capítulo 4*.

2 APLICAÇÕES DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINAS EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS

NO intuito de ilustrar o potencial de aplicação da aprendizagem de máquinas às redes celulares, este capítulo traz um levantamento bibliográfico atual sobre o tema. Em geral, as publicações elencadas se referem a aplicações um tanto quanto peculiares no campo das comunicações sem fio móveis infraestruturadas, espalhadas ao longo de seus mais diversos tópicos. Muitas dessas publicações trazem conclusões empolgantes acerca da aprendizagem de máquinas frente a abordagens convencionais para lidar com problemas específicos das comunicações móveis. Além de serem aplicadas para lidar com problemas clássicos das comunicações móveis, a aprendizagem de máquinas tem proporcionado um ponto de vista alternativo em comparação a abordagens consolidadas, dando abertura a lidar com novos paradigmas que vêm surgindo com a constante evolução das redes celulares.

O levantamento aqui apresentado não se propõe ser o mais amplo nem o mais profundo. Nem mesmo a delimitação dos tópicos elencados deve ser considerada definitiva ou imutável. Ainda assim, o corrente levantamento realça algumas linhas de investigação bem-sucedidas, as quais podem servir como uma orientação básica a novas aplicações.

Os tópicos elencados na seção 2.2 são resultado de um agrupamento feito a partir de uma pesquisa bibliográfica geral e extensa a respeito do emprego da aprendizagem de máquinas em comunicações móveis conduzida de acordo com os critérios descritos na seção 2.1. Na seção 2.3 procede-se à classificação das máquinas adaptativas mais empregadas em cada tópico. Por fim, a seção 2.4 traz um resumo dos pontos mais relevantes apresentados no capítulo.

2.1 Critérios

De modo a iniciar a pesquisa bibliográfica sobre o tema, optou-se pela base de dados *Web of Science*[®] [Reuters 2012]. Trata-se de uma base de dados multidisciplinar, a qual indexa publicações em cerca de 12.000 periódicos de alto impacto e 150.000 anais de conferência.

Antes de prosseguir, vale esclarecer os operadores da base de dados *Web of Science*[®] aqui empregados: AND, OR e NOT se referem aos operadores lógicos booleanos de conjunção, disjunção e negação, na mesma ordem, enquanto que \$ denota um ou nenhum caractere.

A escolha dos critérios da pesquisa atentou para a flexibilização, buscando amplitude de casos ao mesmo tempo que rejeita sub-casos que de antemão sabe-se não serem de interesse. Devido à intratabilidade em lidar com a grande quantidade de publicações encontradas, a pesquisa passou então a limitar-se a certos campos de busca, seguindo a expressão lógica ARGUMENTO1 AND ARGUMENTO2 NOT ARGUMENTO3, bem como às áreas de Telecomunicações, Ciências da Computação e correlatas. Além disso, o recurso de lematização foi desativado. O primeiro e o segundo argumentos são restritos à pesquisa no campo *tópicos*, sendo definidos, respectivamente, por ARGUMENTO1 = (cellular OR wireless OR mobile) e ARGUMENTO2 = (neural OR machine\$learning OR kohonen OR radial\$basis OR perceptron OR reinforcement OR support\$vector OR k\$means OR clustering). O terceiro argumento restringe-se aos títulos dos artigos, sendo definido com ARGUMENTO3 = sensor, na intenção de rejeitar trabalhos sobre *wireless sensor networks*. Em seguida, eliminaram-se os falso positivos, na maioria, relacionados às ciências biológicas. Por simplicidade de nomenclatura, o resultado dessa pesquisa é aqui denominado *levantamento inicial*.

Na etapa seguinte, buscou-se reproduzir pesquisa similar também na base de dados *IEEEExplore*[®] [IEEEExplore]. Nesta há uma limitação do número de termos da expressão booleana e não há recurso equivalente ao do *Web of Science*[®] para denotar um ou nenhum caractere. A pesquisa foi limitada a periódicos e, ao invés de restringir os campos de busca, utilizou-se a opção *metadata*, incluindo assim resumo, título do texto e termos de indexação.

Após mesclar os resultados provenientes das bases de dados *Web of Science*[®] e *IEEEExplore*[®], fez-se uma filtragem cuidadosa, artigo a artigo, eliminando os trabalhos

relacionados a redes com características mais distantes das celulares, tais como relacionadas a termos como *ad hoc*, *wireless sensor networks* e *multihopping*. Por fim, incluíram-se mais artigos à medida que os artigos lidos referenciavam a trabalhos diferenciados e de sucesso. O resultado dessa pesquisa é aqui denominado *levantamento selecionado*, conforme organizado nos tópicos elencados a seguir.

2.2 Tópicos sobre Comunicações Móveis

As publicações mais relevantes contendo aplicações de aprendizagem de máquinas em comunicações sem fio móveis estão organizadas em oito tópicos. São eles: gerenciamento de recursos, adaptação da transmissão, projeto de arranjo de antenas, receptores, predição da propagação, análise de tráfego, provisão e rastreamento da mobilidade, e operação e planejamento da rede. Esses tópicos são resultado de um agrupamento realizado sobre a pesquisa bibliográfica a respeito do emprego da aprendizagem de máquinas em comunicações sem fio móveis. Há ainda um nono tópico identificado como de grande interesse para aplicação de aprendizagem de máquinas, presente em 15 artigos selecionados, que, no entanto, não será aqui elencado por já possuir um levantamento bibliográfico publicado (vide He et al. (2010)). Trata-se do tópico *rádio cognitivo*, ainda em grande evidência nas redes celulares, trazendo questões relacionadas ao uso de espectro ocioso de forma não nociva e à reconfigurabilidade da tecnologia de rádio-acesso.

Dentro de cada tópico elencado, acredita-se terem sido apontados ao menos os trabalhos mais relevantes. Por sua vez, muitos dos trabalhos apontados referenciam uma variedade de outros trabalhos relacionados, mas que, no entanto, não foram aqui elencados. Esses trabalhos são aqui considerados como referências implícitas.

2.2.1 Gerenciamento de Recursos de Rádio

O gerenciamento dos recursos de rádio (GRR) se tornou mecanismo estratégico para a manutenção da qualidade do serviço QoS (do inglês, *quality of service*) em sistemas de comunicação sem fio móveis, frente às condições de canal, ruído e interferência que transmissores e receptores ficam sujeitos, bem como a algumas restrições que normalmente permeiam um sistema de comunicação sem fio móvel comercial, tais como a escassez dos recursos de rádio e a liberdade de migração dos usuários entre as células. Em seguida, estão relacionados alguns dos trabalhos principais que se utilizam

de ferramentas provindas dos estudos de aprendizagem de máquinas. Entretanto, a última restrição mencionada acima apresenta algumas peculiaridades inerentes a outro mecanismo típico das redes celulares – o *handoff* –; alguns trabalhos nessa linha de investigação estão relacionados na seção 2.2.7 sobre provisão e rastreamento da mobilidade.

Recentemente foram publicados trabalhos que adotam uma problemática bem abrangente para o GRR conjunto, cujo arcabouço atenta para um cenário multioperadora e multirádio. Giupponi et al. (2009) desenvolveram uma solução híbrida incorporando lógica difusa e redes neurais artificiais (RNAs), utilizando-se ainda de técnicas de aprendizado por reforço. Focando-se em um cenário em que os sistemas *Long Term Evolution* (LTE) e *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) coexistam, Vučević et al. (2011) propuseram um algoritmo de GRR conjunto, baseado no aprendizado por reforço, e formulado em termos de múltiplos serviços e células.

Há, no entanto, aplicações menos abrangentes, porém tão valiosas quanto as acima mencionadas. Estratégias de gerenciamento de recursos, como por exemplo, controle de admissão, escalonamento, alocação e gerenciamento da interferência, também têm sido investigadas separadamente.

Ahn & Ramakrishna (2004) propuseram um algoritmo de controle de admissão de conexões diante de serviços multimídia. O algoritmo busca prover o melhor nível de QoS possível para todas as conexões ao mesmo tempo que atenta para a maximização da utilização dos recursos disponíveis como também para o aprimoramento da justiça. eventos de *handoff* e novas conexões. Ahn & Ramakrishna (2004) formulam o problema como sendo multiobjetivo e adotam uma RNA de *Hopfield* para tratá-lo, a qual permite resposta rápida o bastante para atuar em tempo de execução.

Também para o controle de admissão, porém focando-se em sistemas *code-division multiple access* (CDMA) de banda larga, Shen et al. (2004) integraram um preditor neural da interferência de curto prazo a um processador de lógica difusa encarregado de tomar decisões sobre admissão de novas chamadas. Utilizando-se de programação neural dinâmica, Liu et al. (2005) desenvolveram um algoritmo de controle de admissão capaz de melhorar seu desempenho à medida que se ganha experiência; seu aprendizado pode se dar tanto fora quanto dentro do tempo de execução, i.e. tanto *offline* quanto *online*.

Com o objetivo de fazer bom aproveitamento dos recursos de rádio disponíveis e, ao mesmo tempo, estabelecer alguma política de inter-relação de compartilhamento

entre os usuários, estratégias de escalonamento têm se apresentado como primordiais. Com uma formulação abrangente do problema, Fiengo et al. (2007) apresentam um escalonador multimídia – vídeo e voz em tempo real e web em tempo não-real – e multiobjetivo – vazão, perda de pacote, justiça, atraso e *jitter*. Tal escalonador é baseado em RNAs bem como na teoria do aprendizado por reforço. No caso investigado por Shen et al. (2009), a estrutura do escalonador toma como base a RNA celular proposta por Chua & Yang (1988).

Os autores se depararam com a necessidade de realizar a alocação de canal de maneira ainda mais eficiente enquanto investigavam a inserção de microcélulas em um sistema celular convencional à época (leia-se meados da década de 90). Essa inserção de microcélulas consistia em uma tentativa de provimento dos requisitos de qualidade que já vinham se tornando cada vez mais restritos. Devido a dificuldades apresentadas pelos métodos convencionais de alocação de recursos no que tange tanto à obtenção de resultados ótimos em tempo real quanto à variação da interferência, os autores trabalharam a abordagem de alocar o canal com base em experiências passadas. Para tanto, eles se utilizaram de uma rede auto-organizável (SOM) (do inglês, *self-organizing map*) de Kohonen com domínio espaciotemporal, i.e., cuja entrada é função de um vetor de força do sinal devidamente indexado ao longo das estações rádio base e dos canais constituintes do sistema.

Com uma abordagem diferente para o problema, Calabuig et al. (2006) aplicaram uma RNA de *Hopfield* para alocação de largura de banda por usuário dentre um número limitado de opções. Novamente empregando RNAs de *Hopfield*, Calabuig et al. (2010) propõem um algoritmo que simultaneamente seleciona a tecnologia de acesso de rádio que seja mais apropriada juntamente com a quantidade de recursos. Mesmo em um cenário multisserviço, o algoritmo garante a provisão da QoS em termos tanto de atraso quanto de taxa de bits. Em seu trabalho, Caviglione (2010) reserva largura de banda para serviços *voice over internet protocol* (VoIP). Utilizando-se de uma rede *multilayer perceptron* (MLP) e com base em informações de desempenho e tráfego corrente, faz-se a predição da largura de banda requerida que deve ser reservada.

Em Chatterjee & Das (2005), os valores alvos de *signal-to-interference plus noise ratio* (SINR) dos usuários móveis de um sistema CDMA são organizados ao longo de um vetor. Mesmo sob a influência de um controle de potência ideal, esse vetor de SINR varia juntamente com os requerimentos de QoS. Assim, a representação do vetor SINR no espaço multidimensional de QoS torna-se apropriada, permitindo

inclusive uma estimativa do desempenho do sistema. Para tornar o procedimento factível computacionalmente, os autores aplicam quantização vetorial (QV) estruturada em árvore ao espaço de QoS, particionando-o em um número finito de regiões. O procedimento é adotado para definir algoritmos de admissão de serviço e alocação de recursos.

Uma técnica de GRR talvez menos comum, porém não menos importante, refere-se ao gerenciamento da interferência. O gerenciamento da interferência intercelular é o foco do trabalho de Rengarajan & Veciana (2011). A ideia-chave consiste no agrupamento e na agregação das cargas de tráfego em classes de usuários com similaridade em relação à sensibilidade à interferência. Emprega-se o algoritmo k-médias para lidar com os ganhos logarítmicos, para cada um dos usuários, referentes às estações rádio bases vizinhas. Trata-se de uma abstração que simplifica muito a otimização do sistema bem como dos cabeçalhos de comunicação. Os benefícios relatados são vários: redução da potência de transmissão, diminuição dos atrasos na transferência de arquivos para usuários do tipo menor-esforço, e melhora da homogeneidade espacial do serviço.

2.2.2 Adaptação da Transmissão

De uma forma geral, pode-se dizer que há vários parâmetros distribuídos ao longo de diversas camadas – tais como modulação, potência, codificação de bloco, codificação de canal (i.e. taxa, topologia, entrelaçamento, código de embaralhamento, códigos de espalhamento etc.) e o modo das múltiplas antenas – que podem ser ajustados para otimizar algum requisito de QoS diante das atuais condições. Como requisito de QoS têm-se tipicamente a vazão e a taxa de erro de blocos, e sua otimização pode ser realizada com base em certas restrições, tais como número de símbolos por quadro, potência de transmissão e número de códigos. Por sua vez, a condição atual da transmissão pode ser inferida através, por exemplo, de medidas diretas da qualidade do canal, da versão de retransmissão, e do histórico de erros.

Os modelos convencionais de adaptação de enlace, baseados no mapeamento da qualidade de canal para a vazão são incapazes de lidar, de maneira factível, com aspectos como não linearidades dos circuitos envolvidos e aqueles provenientes de fatores ambientais e de fatores de cenário tal como a interferência cocanal. Isso porque a função de mapeamento passa a ser variante no tempo, bem como na frequência e no espaço. Uma abordagem mais apropriada consiste em promover o ajuste da função

de mapeamento de maneira dinâmica, conforme dados capturados em tempo real. As máquinas adaptativas em geral são fortes candidatas a essa aplicação, visto serem inerentemente orientadas pela massa de dados, o que permite a captura da relação causa-efeito ainda que de maneira implícita.

Em Wang & Lin (2008), optou-se por ajustar um parâmetro da camada *medium access control* (MAC) em uma rede 802.11 para prover a QoS em um cenário multisserviço. Dinamicamente, com base na condição do canal e nas restrições de QoS, ajusta-se o tamanho inicial da janela de contenção. Os autores adotaram uma rede MLP para aprender tal correlação, bem como generalizá-la.

Nos trabalhos de Daniels & Heath Jr. (2009) e de Yun & Caramanis (2010), estudou-se a adaptação de taxa como um problema de seleção de esquema de modulação e codificação MCS (do inglês, *modulation and coding scheme*), sendo empregados e comparados os algoritmos *k* vizinhos mais próximos (kVP) (do inglês, *k-nearest neighbor*) e *support vector regression* (SVR). No trabalho de Rathinasabapathy & Nakkeeran (2012), dedicado a redes de comunicação sobre linhas de potência, utiliza-se uma rede *radial basis function* (RBF)¹ para predizer o estado de um canal banda larga, conforme uma série temporal, para então auxiliar a adaptação de enlace.

Como uma extrapolação desse conceito de adaptação de enlace, a adaptação *cross-layer* é investigada no trabalho de Wang et al. (2007), onde os parâmetros da camada MAC são ajustados em função das condições do canal bem como dos requerimentos de QoS da camada de aplicação. Para tanto, uma MLP foi especialmente estruturada.

2.2.3 Projeto de Arranjo de Antenas

Algoritmos estimadores dos ângulos de chegada dos sinais em um receptor têm papel muito importante, visto permitirem o discernimento entre as fontes transmissoras através de técnicas como *multiple signal classification* (MUSIC), i.e., as parcelas de sinal recebido provenientes do usuário de interesse e dos interferentes podem ser identificadas. Antenas dispostas em arranjos constituem o principal interesse nessa matéria. Os trabalhos publicados em Chang et al. (1992) e Southall et al. (1995) aplicam as RNAs como viabilização computacional para executar os algoritmos de super-resolução em tempo real, empregando a rede de *Hopfield* e variantes da RBF,

¹Em Rathinasabapathy & Nakkeeran (2012), esse mesmo estudo é estendido de modo a contemplar também as redes *exact radial basis* e *generalized regression neural*.

respectivamente. Em Zooghy et al. (1997), diferentemente, os autores lidam com o problema de estimação como um mapeamento, e empregam uma rede RBF para tratá-lo. Independente da arquitetura empregada, as principais vantagens em se empregar as RNAs é que estas, através de sua capacidade de generalização (fora de amostra), permitem prever ângulos não levados em conta durante o treinamento. Além do mais, a estrutura típica das RNAs favorece até mesmo a implementação, que pode ser na forma de circuitos analógicos, podendo-se ainda proporcionar uma resposta muito rápida. Não que esse benefício não deva ser considerado nas aplicações atuais, mas deve-se ponderar que sua atratividade era maior à época dessas publicações citadas, sendo que hoje nos encontramos em uma situação mais evoluída em termos de respostas dos circuitos digitais.

Têm-se também aplicações de *support vector machine* (SVM) para lidar com o problema da estimação das direções de chegada [Pastorino & Randazzo 2005, Randazzo et al. 2007]. Utilizando-se de um modelo SVR, Ayestarán & Las-Heras (2005) apresentam algumas técnicas eficientes para moldar o padrão de radiação de um arranjo de antenas. Mais do que ajustar deliberadamente o padrão de radiação de uma determinada antena, o ajuste pode ser realizado para todas as antenas envolvidas, de maneira conjunta, com o intuito de potencializar a recepção dos usuários de interesse. Com base na separação das fontes, os padrões de radiação das antenas devem supostamente ser adaptados para realçarem o feixe para o usuário desejado ao mesmo tempo em que anulam os feixes vistos como interferência pelos demais usuários. Em Zooghy et al. (1998), os autores empregam uma rede RBF na tentativa de encontrar os valores ótimos para os coeficientes do bloco formatador de feixe, enquanto que em Ramón et al. (2005) o modelo adotado foi o SVM. Em Chen et al. (2008), estende-se a ideia para criar um detector não linear para modulações complexas. Para tanto, os autores empregaram uma rede denominada RBF simétrica e o algoritmo de agrupamento k-médias.

Há ainda outra frente expressiva de aplicação de aprendizagem de máquinas a arranjos de antenas, focada no controle de harmônicos provenientes da não linearidade na resposta dos amplificadores constituintes dos transmissores e receptores. A abordagem normalmente empregada para lidar com isso consiste em ajustar os parâmetros do arranjo de antenas, tal como os espaçamentos entre os elementos, de modo a reduzir os harmônicos ao menos ao longo de algumas direções previamente julgadas como sendo de interesse. As RNAs já estão estabelecidas como uma sólida abordagem para esse tipo de problema. No trabalho de Siakavara & Goulemes (2008),

por exemplo, os autores aplicaram a rede RBF com o objetivo de justamente determinar o apropriado espaçamento entre os elementos do arranjo de modo a reduzir o padrão de radiação sob os harmônicos sem afetar o padrão de radiação à frequência fundamental.

2.2.4 Receptores

A modelagem do filtro inverso é uma das tarefas básicas que podem ser delegadas às RNAs, conforme elencada no livro de Haykin (2008). É justamente esse tipo de tarefa que é realizado ao se equalizar o canal de comunicação como forma de mitigação da interferência intersimbólica. Coloma & Carrasco (1994), usando-se de uma rede MLP, propuseram a equalização, juntamente da demodulação, de um canal com desvanecimento *Rayleigh* em um enlace empregando modulação *Gaussian minimum shift keying* (GMSK). Nesse caso, a RNA busca imitar o que seria o comportamento ideal de um conjunto equalizador-demodulador. Os autores mostraram que, em detrimento de uma maior complexidade, sua solução fornece um melhor desempenho se comparada aos tradicionais equalizadores de decisão realimentada. Uma arquitetura de RNA baseada em *perceptrons* muito mais especializada para equalização-demodulação de canal é desenvolvida no trabalho de Xiang & Bi (1996). Uma modelagem alternativa como problema de classificação é dada em Savazzi et al. (1998). Focando ainda em uma aplicação a sistemas de modulação codificada, Ng et al. (2004) desenvolvem uma estrutura turbo de equalização assistida por redes RBF na estimação de algumas probabilidades em domínio logarítmico.

No trabalho de Wang & Wicker (1996), propõe-se uma estrutura de RNA para funcionar como um decodificador de *Viterbi*. A justificativa à época era proporcionar uma maior velocidade em decodificar códigos convolucionais se comparada aos aparatos construídos com tecnologia puramente digital. Deve-se, no entanto, considerar que a solução foi concebida para canal com ruído branco gaussiano aditivo AWGN (do inglês, *additive white Gaussian noise*), despreocupando-se de aspectos como, por exemplo, a variabilidade dos canais móveis e a conseqüente necessidade de retreinamento. Tal estrutura foi explorada buscando também uma solução de decodificação eficiente, criando inclusive versões híbridas digital-analógicas. Resultados de simulação mostraram que o decodificador neural pode ter desempenho tal qual o do algoritmo de *Viterbi*.

Ao se adentrar no conceito de *software radio*, o interesse pela adaptabilidade fica mais patente. Em Palicot & Roland (2003), os autores descrevem uma solução mais

ampla, auto-adaptativa, que de maneira cega identifica o sistema em uso para então reconfigurar o terminal móvel. Essa identificação do sistema consiste em um problema de reconhecimento de padrões, em que os padrões são estabelecidos com base nas distâncias entre portadoras adjacentes. Para resolvê-lo, calcula-se a densidade espectral de potência do sinal para alimentar a entrada de uma rede RBF. Palicot & Roland (2003) se abstêm da fase de demodulação. Já no trabalho de Helmy & Zaki (2009), o foco é justamente proceder à identificação da modulação por meio de ferramentas de agrupamento.

Há ainda um tipo de aplicação de RNAs mais peculiar, específico de sistemas de múltiplo acesso espectralmente espalhados. Esses sistemas comumente têm o desempenho de seus receptores acometidos do *efeito near-far* – efeito este caracterizado quando a potência recebida proveniente de fontes interferentes é alta com relação à do sinal desejado. Receptores ótimos são conhecidos, porém sua complexidade cresce exponencialmente com a população de usuários ativa. Por essa razão, o interesse por soluções subótimas tornou-se uma constante na literatura especializada [Verdú 1998]. O trabalho seminal para aplicação de RNAs foi o de Aazhang et al. (1992), o qual propôs duas estruturas baseadas em MLP. Motivados por trabalhos bem-sucedidos de aplicação de redes RBF para a mitigação da interferência intersimbólica diante de canais de comunicação dispersivos, Mitra & Poor (1994) propuseram uma rede RBF para realizar a demodulação multiusuário em sistemas CDMA, além de também investigarem o uso do *perceptron* como parâmetro de comparação. Soluções ainda mais especializadas na mitigação da interferência estão disponíveis na literatura, tais como Das & Morgera (1998), Chuah et al. (2001) e Raju et al. (2006), em que o termo interferência contempla desde a interferência típica de um sistema múltiplo acesso de uso regular, passando ainda pela interferência impulsiva e indo até aquela interferência supostamente intencional (viz. *jamming*). As soluções consistiram desde uma técnica de ICA (do inglês, *independent component analysis*) associada ao arranjo de antenas até o uso das redes RBF e MLP.

2.2.5 Predição da Propagação

Há pelo menos duas décadas vêm sendo publicados trabalhos científicos empregando RNAs com vistas à predição da propagação. Devidamente treinadas, essas RNAs podem posteriormente funcionar como preditores da propagação, tal como investigado nas publicações Stocker & Landstorfer (1992), Nešković et al. (2000), Östlin

et al. (2010) e suas referências. Na abordagem de Stocker & Landstorfer (1992), uma MLP é treinada para aproximar a função dada pela fórmula de perda de propagação de *Hata*, tendo como entrada a altura das antenas transmissora e receptora, a distância entre elas e a frequência portadora. A flexibilidade do método permite levar em conta dados sobre cobertura e topografia. O trabalho de Nešković et al. (2000) é focado em ambientes fechados, sendo que alguns parâmetros da construção são entrada para a rede MLP de duas camadas ocultas. Uma abordagem mais ampla, porém também mais comedida, é apresentada por Östlin et al. (2010) em que se aborda a complexidade e a eficiência tanto da arquitetura da rede quanto do algoritmo de ajustes de seus pesos.

2.2.6 Análise de Tráfego

A aplicação de aprendizagem de máquinas para lidar com questões relacionadas a comportamento de usuários e tráfego se dá de diversas formas, desde a estimação de tráfego [Tutschku & Tran-Gia 1998] até a personalização de conteúdo [Paireekreng & Wong 2009]. Entretanto, há outras tendências mais expressivas dessa investigação.

Krenker et al. (2009) introduziram um novo modelo para detecção de fraudes, onde fraude se refere ao uso indevido de algum serviço. O comportamento dos usuários é monitorado em termos de duração das chamadas. Um longo histórico desse comportamento é usado para treinar um preditor baseado em RNA bidirecional. Durante o funcionamento da rede esse valor predito é comparado ao valor monitorado. Um alerta é acionado sempre que a discrepância entre os dois valores for grande, indicando possível fraude. Já, o foco do trabalho de El-Khatib (2010) é a intrusão nas camadas mais baixas de protocolo em uma rede 802.11. Um algoritmo de agrupamento k-médias é empregado para determinar o conjunto ótimo de características que aprimora a exatidão do detector de ataques. Para detectar a intrusão, são construídos classificadores neurais – viz. *perceptron*, MLP e misto de ambos – capazes de distinguir o tráfego entre normal e intrusivo.

Em Liaskos et al. (2009), a análise de agrupamento é adotada no escalonamento de um canal de *broadcast*. O algoritmo k-médias é empregado para agrupar as páginas de acordo com a popularidade apresentada entre os usuários.

Há ainda publicações dedicadas à avaliação da qualidade de uma sequência de vídeo, seja pela predição da qualidade a ser percebida seja pela detecção de erros. Farrugia & Debono (2009) apresentam um eficiente método, baseado em um

classificador SVM, para detecção e localização de segmentos corrompidos em uma transmissão de vídeo. Já no trabalho de Khan et al. (2010), o objetivo é prever qual a qualidade do vídeo em termos de *mean opinion score* (MOS) a partir de parâmetros advindos das camadas física – *block error rate* (BLER) e largura de banda – e de aplicação – tipo do conteúdo, taxa de bits do transmissor e taxa de quadros –. Para tanto os autores desenvolveram uma arquitetura que é um misto entre RNA e lógica difusa.

2.2.7 Provisão e Rastreamento da Mobilidade

A mobilidade dos usuários é característica indelével das redes celulares. Em tese, esse tipo de rede deve suportar seus usuários, estejam eles onde estiverem, estejam eles imóveis ou não, desde que compreendidos na devida área de cobertura. De modo a manter a qualidade de serviço para seus usuários mesmo em deslocamento, o uso de algumas tecnologias se faz necessário. Não apenas técnicas de processamento devem ser aplicadas nos transmissores e/ou receptores para lidar com o efeito *Doppler* sobre o sinal recebido, mas também são requeridas estratégias de sucessão de célula servidora visto que uma parcela do tráfego passa a migrar de uma célula à outra. Devido a variações na interferência cocanal e, principalmente, a dificuldades em se disponibilizar recursos na próxima célula servidora em tempo hábil, uma precária manutenção do tráfego torna-se iminente nesta troca de célula servidora.

No caso de chamadas de voz esse problema fica mais evidente com a queda da chamada. Uma solução básica consiste em reservar certo número de canais para o processo de *handoff*, porém sacrificando a probabilidade de bloqueio de novas chamadas. Não é trivial escolher qual o número ótimo de canais a reservar nessas ocasiões, sobretudo se as variações no tráfego forem expressivas. Soluções tradicionais de otimização passam a ser inviáveis diante de cenários mais realistas. Em virtude disso, El-Alfy et al. (2006) propuseram uma solução fundamentada no aprendizado por reforço aplicada para assimilar uma política ótima em tempo de execução a partir de interações com o ambiente. O aprendizado por reforço é uma classe de ferramenta capaz de melhorar seu desempenho de maneira incremental.

À medida que se aumenta a velocidade em que o usuário transita de uma célula a outra, mais comprometido tenderá a ficar o tráfego, pois se aumentam as chances de não se completar o processo de *handoff*, visto este ser composto de um protocolo com várias etapas. Wu & Weng (2011) analisaram o processo de *handoff* em uma rede IEEE 802.11 sob um ambiente veicular e propuseram um processo mais rápido. De

início, a rede passa a ser integrada ao *Global Positioning System* (GPS). Daí dispendo das medidas de distância dos veículos aos pontos de acesso, um algoritmo k-médias difuso é aplicado para determinar o melhor ponto de *handoff*.

Para prover informações adicionais aos mecanismos de gerenciamento de mobilidade da rede (viz. *handoff* e localização), estimativas tanto de posição dos usuários quanto de velocidade também têm sido exploradas na literatura. O desempenho dos mecanismos de *handoff* pode ser drasticamente melhorado com informações sobre a velocidade do móvel. Essa informação pode ser tão simplesmente a classificação da mobilidade entre lenta e rápida, realizada por Balis & Hinton (1998) por meio de uma MLP com as entradas alimentadas por derivadas temporais dos valores médios de força dos sinais provenientes das seis estações rádio base mais fortes candidatas a servir um dado usuário.

Quanto à estimação de posição de um telefone celular, essa tarefa está principalmente relacionada à localização do usuário por questões envolvendo segurança. As técnicas de rádio localização são diversas, indo desde técnicas de triangulação até as baseadas no ângulo de chegada do sinal [Rappaport et al. 1996]. Baseados em estimativas da *força do sinal recebido* (FSR), Salcic & Chan (2000) exploram as MLPs para lidar com o problema de localização de duas maneiras distintas: a primeira é lidar como um problema de classificação, em que a área de interesse é seccionada tanto quanto se queira; a segunda consiste em tratar como um problema de aproximação de funções. A segunda maneira é mais indicada quando se prioriza melhor precisão, e pode se dar tanto através da predição da distância e ângulo aplicada a cada uma das células como também a estimação direta das coordenadas correspondentes à localização. Fang et al. (2011) fazem uso da informação sequencial de FSR de modo a lidar com as variabilidades típicas dos canais móveis como entrada de uma MLP. Seguindo o mesmo conceito, Fang et al. (2012) propuseram então duas arquiteturas de RNAs dinâmicas de modo a estimar as coordenadas da posição dos usuários. Uma alternativa para estimativa de posições para sistemas rádio cognitivos, que se utiliza de agrupamento através da *weighted centroid localization* (WCL), é criteriosamente analisada em Wang et al. (2011).

No intuito de reduzir os custos de sinalização da atualização da área de localização dos usuários, Quintero (2005) propôs a utilização de uma MLP capaz de reconhecer alguns padrões de áreas de localização dos usuários e antever sua próxima área. Para isso, os usuários são classificados de antemão em três possíveis graus de

previsibilidade com relação à sua localização. Esses mecanismos de localização de área, quando executados periodicamente, têm papel importante no auxílio ao mecanismo de paginação. Por sua vez, a paginação objetiva encontrar a atual célula do usuário chamado, para que a rede possa entregar uma chamada. Se não realizada de maneira comedida, a paginação pode por si só gerar um tráfego significativo. Assumindo haver um padrão na movimentação dos usuários, Majumdar & Das (2005) sugerem um preditor baseado em uma RNA híbrida. Os perfis de mobilidade de todos usuários correspondem ao conjunto de entrada de uma rede SOM, a qual promove um agrupamento apropriado. Para cada agrupamento, uma rede MLP é treinada.

Informações provenientes do *handoff* podem também ter aplicações que vão além das finalidades originais da rede, como, por exemplo, para verificar se veículos estão trafegando em velocidade média esperada ou não. Esse tipo de mecanismo é viabilizado principalmente pela larga proliferação dos telefones celulares, dispensando assim a instalação de sensores. Hongsakham et al. (2008) aplicaram esse mecanismo para o congestionamento em uma rodovia na cidade de Bangkok, Tailândia. Em sua primeira abordagem, os autores aplicaram o algoritmo k-médias com três agrupamentos sobre as medidas de tempo de permanência na célula. A partir daí definiram dois limiares, que em tempo de execução permitiram classificar o congestionamento em três graus: recomendado, não recomendado, e a evitar. Em sua segunda abordagem, que foi a mais exata, os autores empregaram uma rede MLP para o mesmo fim, entretanto, agora o treinamento é supervisionado com base em graus de congestionamento escolhidos pelos pesquisadores.

2.2.8 Operação e Planejamento da Rede

O gerenciamento das redes celulares tem imposto uma série de desafios às operadoras. Salvo particularidades de cada país, potencialmente o mercado da telefonia celular é extremamente competitivo. A análise desse tipo de mercado é um tanto quanto complexa, visto transcender a questões puramente tecnológicas, devendo também levar em conta questões econômicas e de hábitos. Se por um lado é preciso investir em avanços tecnológicos para que se mantenha um bom número de assinantes, esses investimentos devem ser muito bem pensados por conta de sua sustentação econômica bem como em termos de retro-compatibilidade. Com base em dados reais provenientes de uma operadora atuante em uma certa região dos Estados Unidos da América referentes a três meses de operação, Mozer et al. (2000) propuseram alguns

métodos, dentre eles um baseado em rede MLP, que além de predizerem a perda de assinantes para outra operadora também podem ser usados para identificar fatores que contribuam para aumentar a retenção de assinantes bem como a lucratividade das operadoras. A cada assinante associaram-se mais de uma centena de aspectos que podem estar ligados com a evasão, dentre eles: localização, classificação de crédito, classificação do assinante, número de serviços ativos, gastos, número de chamadas realizadas e número das chamadas terminadas de maneira anormal.

A operação das redes celulares por si só é um problema repleto de facetas, incluindo provisão, monitoramento e otimização dos múltiplos serviços. Operar uma rede dessas consiste em um processo cíclico de qualidade iterativa. No ciclo, o alvo de qualidade fim-a-fim é definido e os critérios e limiares de qualidade são determinados para cada tipo de serviço com os indicadores-chave de desempenho KPIs (do inglês, *key performance indicators*). O conjunto de valores de KPIs para um dado instante pode ser denominado padrão de comportamento. Devem-se considerar os KPIs suficientes para captar toda a informação necessária para a conclusão sobre a qualidade de um serviço. Por outro lado, os operadores de rede têm a tarefa de filtrar todos esses KPIs em um nível de fácil interpretação. Laiho et al. (2005) utilizaram uma rede SOM para lidar com múltiplos KPIs decifrando similaridades entre o padrão de comportamento das células. Em seguida, o algoritmo k-médias é aplicado de modo a identificar grupos de células que tenham um padrão de comportamento similar. Barreto et al. (2005) propõem uma técnica baseada em algoritmos de aprendizado competitivo, entre eles a rede SOM, para detectar anomalias nos KPIs para redes de telefonia celular terceira geração (3G). A diagnose, como processo interpretativo, era impreterivelmente deixada por conta do expertise do operador da rede, até que, recentemente, Szilágyi & Nováczki (2012) introduziram um arcabouço integrador de detecção e diagnose automáticas. Nesse arcabouço inovador a diagnose se dá pelo aprendizado do impacto de diferentes falhas sobre diferentes indicadores de desempenho.

2.3 Análise Bibliográfica

Durante o levantamento bibliográfico pôde-se notar uma variedade de maneiras de se empregar a aprendizagem de máquinas para lidar com problemas relacionados a redes sem fio móveis. Ora o aprendizado se dá de maneira supervisionada, ora auto-organizada, ora por reforço. Muito dessa escolha é governado pelas características inerentes ao problema atacado. No entanto, a escolha da máquina adaptativa é

algo mais flexível. Identificar as máquinas adaptativas comprovadamente adotadas para lidar com os tópicos acima apresentados pode servir como um norte para novas investigações.

Na Tabela 2.1 indicam-se quais as máquinas adaptativas observadas, ao menos uma vez, nas publicações selecionadas em cada um dos tópicos anteriormente apresentados. Como o número de máquinas adaptativas é grande, e algumas delas são muito específicas, sendo empregadas em apenas um dos trabalhos, optou-se por mesclar as variantes de uma arquitetura mais básica e popular. Por exemplo: k-médias leva em conta também a aparição de sua variante difusa; *perceptron* consta tal como MLP; Arquiteturas em treliça, reticuladas, cascadeadas e bidirecionais muito específicas são identificadas simplesmente como *estruturas derivadas*; *Crítico adaptativo* é o codinome que contempla as RNAs que se utilizam de aprendizado por reforço em sua forma fundamental.

Os problemas relacionados a GRR são os que foram lidados através das mais diversas técnicas de aprendizagem de máquinas. Isso porque o tópico em si contempla uma diversidade de problemas, como por exemplo agrupamento de usuários em classes e predição do impacto de alguma decisão sobre os recursos. Esse tópico é também o que mais explora o aprendizado por reforço. Tópicos como *adaptação da transmissão, receptores, projeto de arranjo de antenas e predição da propagação* têm explorado mais o aprendizado supervisionado, tais como MLP, RBF e SVM. Em outros tópicos, tais como *análise de tráfego e operação e planejamento de rede*, máquinas auto-organizáveis têm sido mais comuns.

No geral, a rede MLP foi a máquina mais extensivamente empregada nos trabalhos científicos selecionados, sendo observada em 15 desses, seguida pelo crítico adaptativo, presente em 13 desses trabalhos.

Na Figura 2.1, apresentam-se as séries históricas do número de publicações obtidas do levantamento inicial e do levantamento selecionado, entre os anos de 1992 e 2011. Nota-se que ambas as séries apresentam uma forte tendência de crescimento, sobretudo a partir do ano de 2005. Lembrando que o levantamento selecionado inclui o tópico rádio cognitivo além dos outros oito tópicos elencados. Essas duas parcelas são separadas na Figura 2.2, donde percebe-se que o número de publicações aumentou significativamente para ambas em 2005. Entretanto, a tendência de crescimento posterior se concentra no tópico rádio cognitivo.

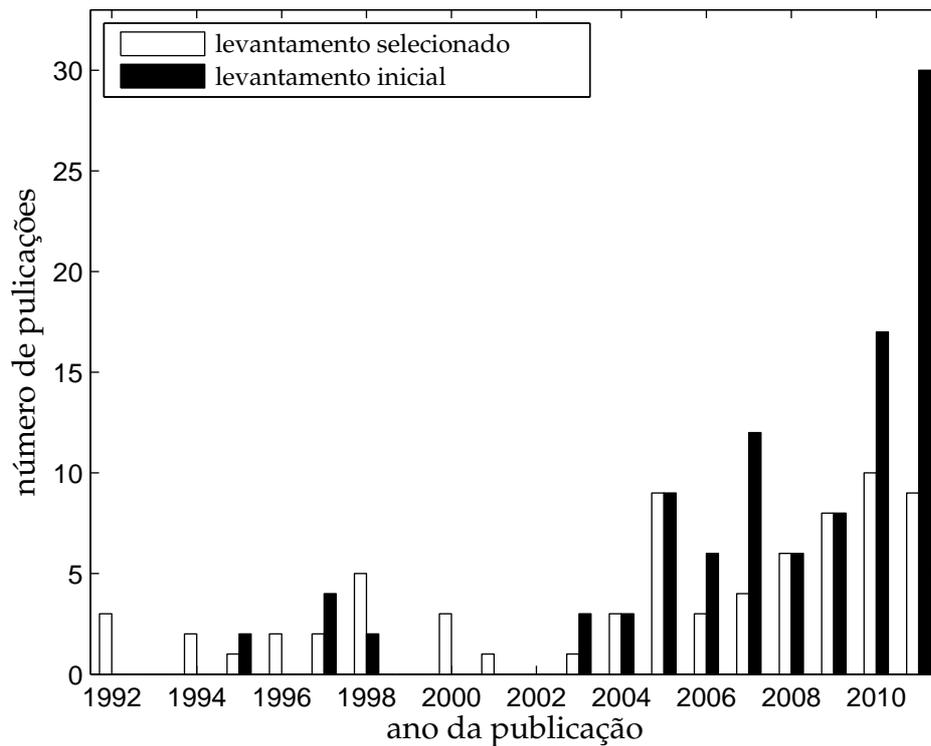


Figura 2.1: Número de publicações por ano obtidas no levantamento inicial e no levantamento selecionado.

2.4 Considerações Finais

Este capítulo trouxe um levantamento bibliográfico sobre aplicações de aprendizagem de máquinas em sistemas de comunicações móveis que tenham sido publicadas em diversas fontes conceituadas, sobretudo, periódicos de alto impacto científico. A descrição das máquinas adaptativas empregadas foi omitida, bem como quaisquer detalhamentos acerca das técnicas e algoritmos de aprendizagem. Ao invés disso, deu-se enfoque aos principais aspectos de cada um dos problemas de comunicação sem fio atacados e à maneira como as máquinas adaptativas foram empregadas. Ao longo das publicações selecionadas, destacaram-se vários aspectos atraentes associados à aprendizagem de máquinas, dentre eles: capacidade de generalização e capacidade de definir um processo de maneira implícita, através, por exemplo, dos dados de exemplo. De fato, encontrou-se uma variedade de máquinas muito distintas, desde as que se utilizam de aprendizado supervisionado, até as auto-organizáveis, passando pelas que se utilizam do aprendizado por reforço. Desse modo, encontraram-se aplicações apropriadas tanto a problemas estáticos quanto dinâmicos, bem como lineares e não lineares.

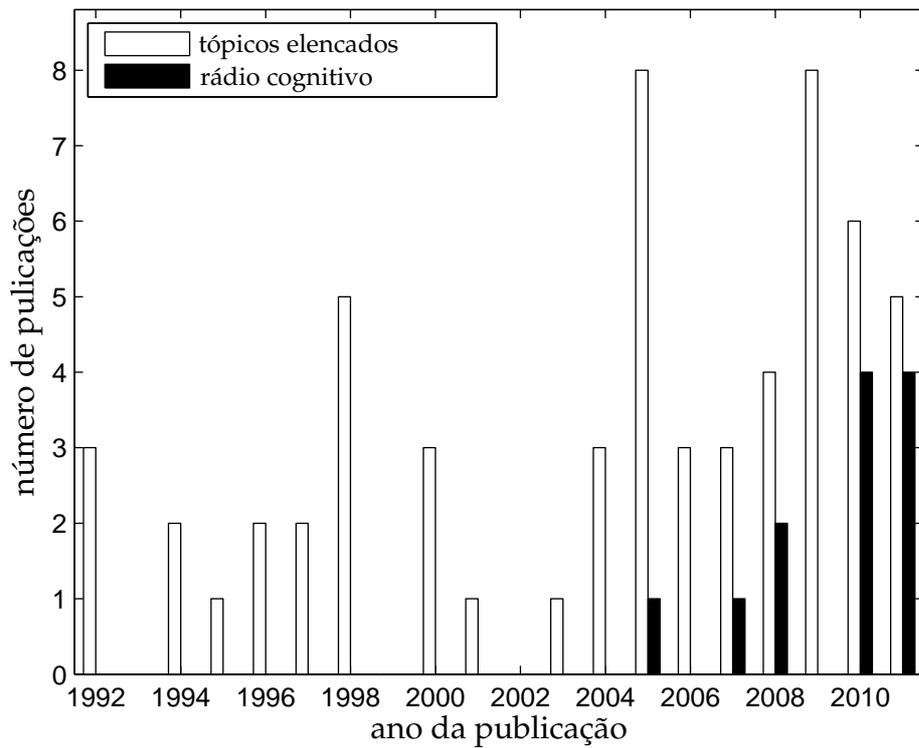


Figura 2.2: Número de publicações por ano obtidas no levantamento selecionado, separando-se os oito tópicos elencados e o tópico de rádio cognitivo.

A diversidade de trabalhos encontrados permitiu identificar classes relevantes para os tipos de aplicação, de acordo com tópicos conhecidos nos estudos de redes de telefonia móvel celulares. Pôde-se então analisar as máquinas mais requisitadas em cada um desses tópicos. Com esse levantamento bibliográfico, acredita-se contribuir à seleção da máquina adaptativa mais apropriada a ser aplicada em futuros problemas de redes celulares.

Tabela 2.1: Indicação das máquinas adaptativas empregadas nas publicações selecionadas nos tópicos apresentados na seção 2.2.

	Gerenciamento de Recursos de Rádio	Adaptação da Transmissão	Projeto de Arranjo de Antenas	Receptores	Predição da Propagação	Análise de Tráfego	Provisão e Rastreamento da Mobilidade	Operação e Planejamento da Rede
<i>multilayer perceptron</i> (MLP)	■	■		■	■	■	■	■
k vizinhos mais próximos (kVP)		■		■				
<i>radial basis function</i> (RBF)			■	■				
<i>support vector machine</i> (SVM)		■	■					
rede neural artificial (RNA) dinâmica							■	
k-médias	■		■	■		■	■	■
<i>self-organizing map</i> (SOM)	■					■	■	■
quantização vetorial (QV)	■							
particionamento recursivo						■		
<i>weighted centroid localization</i> (WCL)							■	
RNA celular	■							
crítico adaptativo	■						■	
Hopfield	■		■					
estruturas derivadas	■			■		■		

3 ASSINALAMENTO DE ENLACES EM CÉLULAS CoMP ATRAVÉS DO MÉTODO DO AGRUPAMENTO

EM janeiro de 2012, a União Internacional das Telecomunicações¹ (ITU) (do inglês, *International Telecommunication Union*) anunciou os padrões para a quarta geração (4G) das comunicações sem fio [ITU 2012]. A Evolução de Longo Prazo - Avançada² (LTE-A) (do inglês, *Long Term Evolution - Advanced*) do 3rd. Generation Partnership Project (3GPP) figurou entre as interfaces terrestres recomendadas pela ITU. Dentre suas tecnologias de destaque, inclui-se a coordenação das estações rádio base (ERBs), a qual está no foco deste capítulo.

Nos sistemas de múltiplos pontos coordenados, simplesmente denominados CoMP (do inglês, *coordinated multipoint*), as ERBs são utilizadas como *pontos de transmissão*, os quais são conectados através de um *backhaul* de alta velocidade, conforme ilustrado na Figura 3.1, formando uma célula hierarquicamente superior: a célula CoMP.

Há dois fatores importantes que contribuem para tornar o CoMP atraente: a distribuição das antenas e a coordenação dos transmissores e receptores. As vantagens da distribuição das antenas podem ser verificadas, por exemplo, ao se comparar o CoMP a um sistema convencional³ com menos pontos de transmissão, tal que a célula convencional tenha a mesma área de uma célula CoMP, porém equivalentes em termos de potência de transmissão disponível. A adequada distribuição dos pontos de transmissão pode melhorar diretamente a cobertura dentro de uma célula, podendo trazer ainda outros importantes benefícios tais como a melhoria da eficiência energética e da capacidade do sistema [Choi & Andrews 2007, Gesbert et al. 2010]. Os usuários posicionados à borda da célula CoMP podem ser especialmente favorecidos com a

¹Informações sobre a ITU podem ser acessadas através do endereço eletrônico <http://www.itu.int>.

²Especificações e relatórios técnicos do *Long Term Evolution - Advanced* (LTE-A) podem ser acessados através do endereço eletrônico <http://www.3gpp.org>.

³Neste contexto, sistema convencional se refere àquele com múltiplos pontos não coordenados.

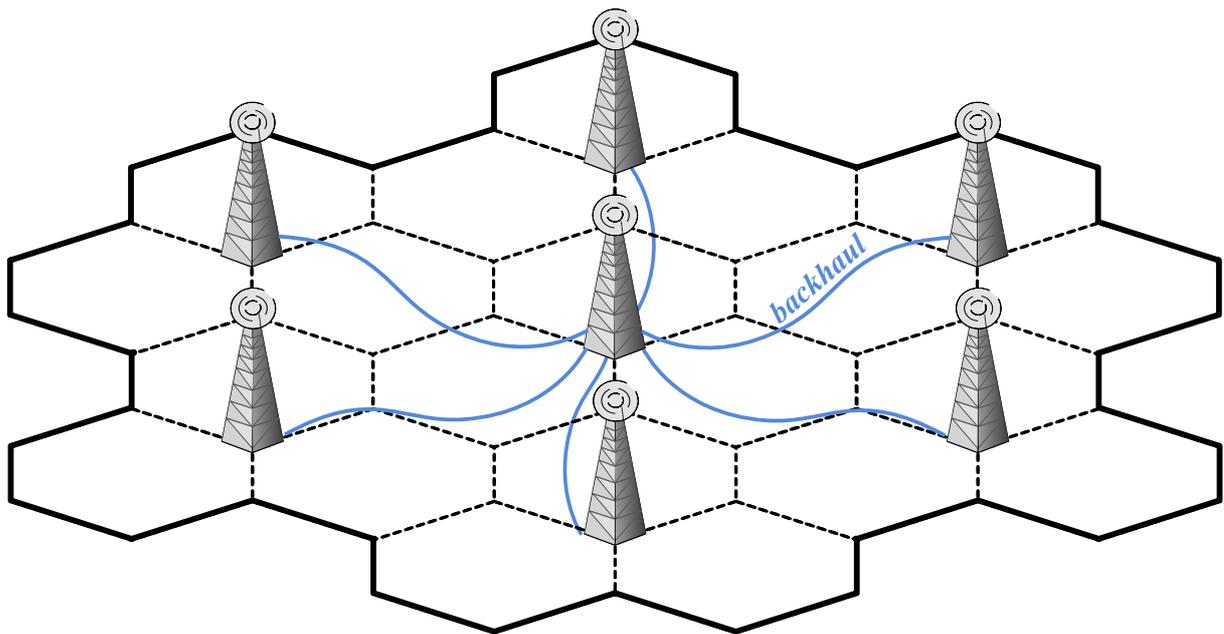


Figura 3.1: Disposição das estações rádio base, doravante denominadas pontos de transmissão, na formação de uma célula CoMP.

redução da interferência intercelular.

A coordenação dos transmissores e receptores, como o segundo fator de atratividade do CoMP, pode proporcionar ganhos mesmo diante de um sistema convencional com a mesma quantidade de pontos de transmissão. Através do *backhaul*, informações importantes podem ser compartilhadas entre os pontos de transmissão, tais como dados dos usuários e estimativas dos canais, favorecendo assim estratégias de transmissão inteligentes. De fato, tais pontos de transmissão (PTs), geograficamente distribuídos, ao servirem simultaneamente diversos equipamentos de usuários (EUs) geograficamente espalhados, formam uma espécie de estrutura macroscópica do tipo *multiple input multiple output* (MIMO), conforme abstração na Figura 3.2, podendo assim tomar proveito da dimensão espacial.

Para que seja possível coordenar as transmissões e controlar a interferência de maneira apropriada, alguma estratégia de gerenciamento dos recursos de rádio (GRR) eficiente deve tomar controle de todos os pontos de transmissão dentro de cada célula CoMP. Entretanto, devido a questões práticas, nem sempre é possível ou apropriado lidar com todos os pontos de transmissão (PTs) simultaneamente. Talvez a quantidade de sinalização e/ou mesmo a complexidade computacional requeridas pela transmissão CoMP não sejam suportadas pelo padrão adotado ou pelos equipamentos disponíveis. Por esse motivo, torna-se crucial considerar o que se denomina *complexidade de*

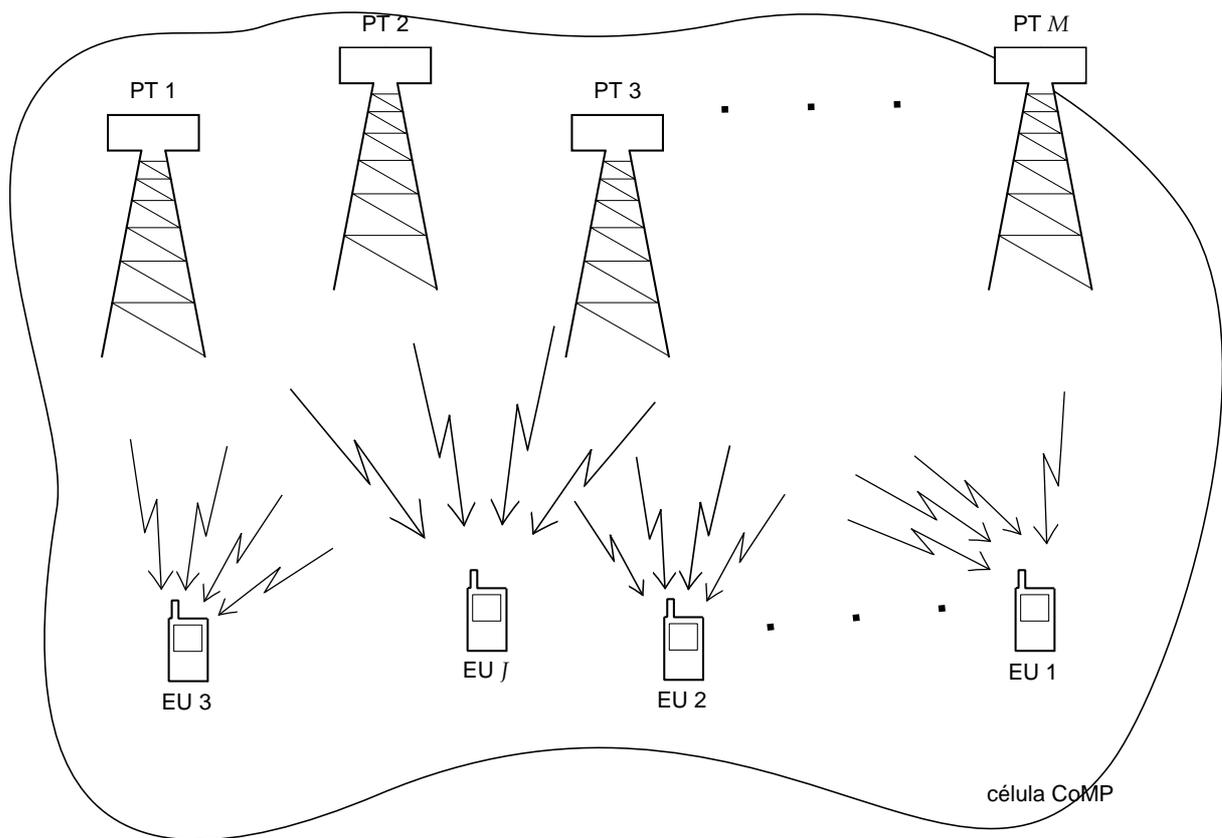


Figura 3.2: Célula CoMP vista como um sistema MIMO macroscópico.

coordenação, a qual pode ser vista sob três facetas [Papadogiannis & Alexandropoulos 2010]. São elas: (i) reportes dos EUs aos PTs; (ii) comunicação entre os PTs; e (iii) carga central de processamento. Cada uma dessas facetas pode ainda ser afetada por alguns fatores que tendem a impedir o pleno usufruto dos benefícios do CoMP, tais como: limitação da capacidade do *backhaul*, inexactidões de sincronismo entre os PTs e imperfeições em medições, estimativas e reportes.

Assim, ao lado do aumento de capacidade proporcionado por essa estrutura MIMO macroscópica, passa a ser imprescindível contrabalancear o custo acarretado para a infraestrutura da rede. Nesta tese, o custo em estudo consiste na complexidade de coordenação, sendo que para reduzi-la, pode-se, por exemplo, restringir que a coordenação ocorra em subconjuntos de pontos de transmissão.

Como será discutido ao longo do capítulo, o agrupamento em subconjuntos permite uma expressiva redução na complexidade de coordenação. No entanto, seu principal efeito colateral é o surgimento de uma nova parcela interferente: a interferência cocanal entre grupos ou simplesmente interferência intergrupo. Se não controlada, essa interferência pode acarretar na perda em termos de taxa agregada do sistema. Dentro

de certos limites, essa perda de capacidade pode ser compensada com a redução na complexidade de coordenação.

Neste capítulo é apresentado um método inovador para a formação dinâmica de grupos de pontos de transmissão em um sistema CoMP. Baseado no algoritmo *k*-médias, o método resulta em implementação simples e de baixa complexidade relativa de execução.

O capítulo está dividido em cinco seções. Na seção 3.1, apresentam-se notação e modelos adotados para o estudo do sistema CoMP considerado. Algumas das principais motivações para as investigações do agrupamento de pontos de transmissão são discutidas na seção 3.2 e, na seção 3.3, apontam-se as principais referências bibliográficas. O detalhamento da abordagem de agrupamento proposta nesta tese é exposto na seção 3.4. Na seção 3.5, discutem-se alguns resultados numéricos obtidos através de simulação computacional. A seção 3.6 traz as considerações mais relevantes para o capítulo.

3.1 Modelagem do Sistema CoMP

Nesta seção apresentam-se a notação e a modelagem do sistema CoMP adotadas ao longo de todo o capítulo. Inicialmente algumas suposições mais gerais são comentadas. O estudo aqui realizado com o sistema CoMP, restringe-se ao seu enlace direto – i.e. transmissão conjunta dos pontos de transmissão aos EUs –, o qual se encontra alocado em banda de frequência dedicada, i.e. o modo *frequency division duplex* (FDD) é o considerado. Não obstante, sempre que apropriado, simplificações pontuais para o modo *time division duplex* (TDD) são devidamente mencionadas. Consideram-se estimativas livres de quaisquer erros e sincronismo perfeito entre os pontos de transmissão (incluindo a unidade central de processamento (UCP)), bem como entre os pontos de transmissão e os EUs. Considera-se ainda que o objetivo principal do gerenciamento de recursos é a maximização de taxa e que cada EU utiliza serviço em tempo não real – portanto, não havendo requerimentos de atraso, latência ou *jitter* – e tenha sempre dados a receber.

Assim como especificado pelo 3GPP, aqui considera-se que o múltiplo acesso baseia-se na tecnologia *orthogonal frequency division multiple access* (OFDMA). Os elementos de recurso são arranjados em blocos de subportadoras adjacentes com determinada duração. Considera-se ainda que a largura de banda de coerência do

canal é maior que a largura de banda do bloco de recursos. As descrições que vêm a seguir lidam com um único bloco de recursos por vez, desse modo, qualquer tipo de interrelação entre os recursos de rádio não é tratada.

A arquitetura CoMP considerada é a centralizada [Gesbert et al. 2010], na qual há uma entidade controladora central, por exemplo, a UCP, que concentra informação de todos os EUs, como os dados a serem transmitidos e as estimativas de canal relativas a todos os PTs.

Neste trabalho faz-se a suposição de que as estimativas do canal sejam perfeitas, i.e. instantâneas e livres de quaisquer erros. Com base nos coeficientes complexos do canal, ou mesmo com base diretamente nas estimativas de *força do sinal recebido* (FSR) (que, por sua vez, podem ser derivadas de estimativas de *signal-to-noise ratio* (SNR)), obtém-se o vetor de força de um determinado usuário, conforme descrito a seguir.

Considere inicialmente que o sistema tem um número C de células CoMP, indicadas por $c = 1, 2, \dots, C$, cada uma das quais com uma UCP controlando um número M de PTs, indicados por $m = 1, 2, \dots, M$. Seja $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ o conjunto ativo dos pontos de transmissão pertencentes à célula CoMP c , e \mathcal{J} o conjunto com todos os EUs ativos nessa mesma célula CoMP. Conforme a Figura 3.2, cada célula CoMP serve um número J de EUs, indicados por $j = 1, 2, \dots, J$. Há ainda um subconjunto, $\mathcal{J}^* \subseteq \mathcal{J}$, contendo os índices dos usuários escalonados para transmitir simultaneamente em um dado instante de interesse.

A potência de transmissão do PT m da célula CoMP c referente ao EU j é denotada por $p_{j,m,c}$, enquanto que o ganho do canal correspondente é $g_{j,m,c} = |h_{j,m,c}|$, onde $h_{j,m,c} \in \mathbb{C}$, compreende perda de percurso, sombreamento, padrão de radiação das antenas e termo de desvanecimento de curto prazo.

Assim, o FSR correspondente será definido por $v_{j,m,c} = g_{j,m,c} p_{j,m,c}$ e se expresso em dB, denotado como $V_{j,m,c}$. O vetor de força do EU j compreendendo todos os PTs pertencentes à célula CoMP c é definido como $\mathbf{v}_{j,c} = [V_{j,1,c} \ V_{j,2,c} \ \dots \ V_{j,M,c}]^T$. A UCP concentra todos os vetores de força de todos os EUs em sua célula CoMP. A Figura 3.3 ilustra o modelo da célula CoMP identificando-se a estimativa dos vetores de força pelos EUs.

O 3GPP distingue duas estratégias básicas de transmissão apropriadas para o CoMP [Gesbert et al. 2010, 3GPP 2010, Feng et al. 2009, Zhang & Hanzo 2010]: escalonamento coordenado e processamento conjunto. No escalonamento coordenado,

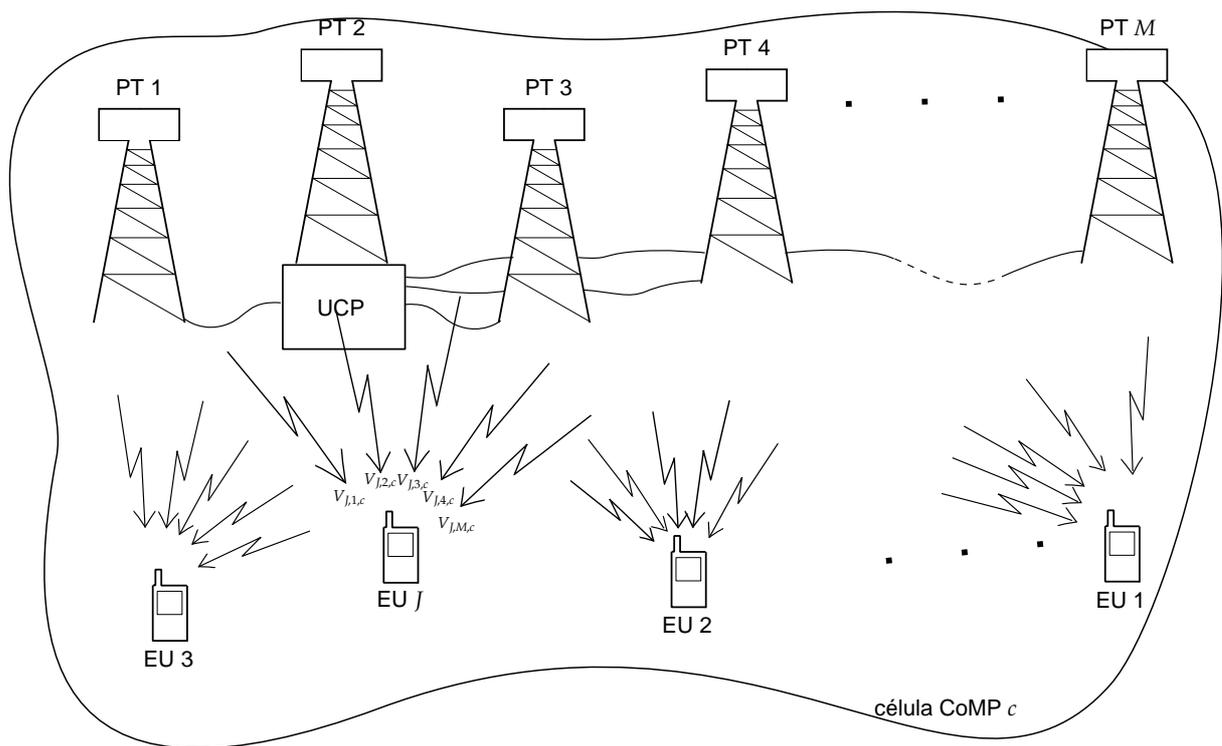


Figura 3.3: Modelo da célula CoMP e os vetores de força.

a transmissão para um determinado EU é realizada por um único ponto de transmissão. Vários pares $\langle PT, EU \rangle$ de comunicação são estabelecidos ao longo da célula CoMP, sendo escolhido um par por vez. Os dados de cada EU estão disponíveis a apenas um ponto de transmissão e apenas o compartilhamento das estimativas do canal é requerido para configurar o transmissor.

No caso do processamento conjunto, os dados de cada EU são simultaneamente transmitidos por múltiplos pontos de transmissão. Assim, tanto as estimativas do canal quanto os dados referentes a todos os EUs são compartilhados, sendo ainda requerido o sincronismo entre os pontos de transmissão. Com o devido processamento espacial, múltiplos EUs podem ser simultaneamente servidos com sucesso.

Por permitir a mitigação da interferência entre os EUs servidos, o processamento conjunto é a estratégia de transmissão explorada ao longo deste capítulo. Através de multiplexação espacial, os sinais destinados aos vários EUs tornam-se mutuamente ortogonais. Uma breve explanação da matéria é apresentada na seção 3.1.1.

3.1.1 Multiplexação espacial

Estratégias MIMO têm como aplicação primária as comunicações ponto a ponto, em que múltiplas antenas equipam tanto o transmissor quanto o receptor. Seja $\mathbf{H}_c \in \mathbb{C}^{J^* \times M}$ a matriz de canal estabelecida em um determinado grupo de coordenação ou célula CoMP c , que pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_c &= \begin{bmatrix} h_{1,1,c} & h_{1,2,c} & \cdots & h_{1,M,c} \\ h_{2,1,c} & h_{2,2,c} & \cdots & h_{2,M,c} \\ & & \ddots & \\ h_{J^*,1,c} & h_{J^*,2,c} & \cdots & h_{J^*,M,c} \end{bmatrix} \\ &= [\mathbf{h}_{1,c} \ \mathbf{h}_{2,c} \ \cdots \ \mathbf{h}_{J^*,c}]^T, \end{aligned} \quad (3.1a)$$

onde J^* é o número de EUs a serem servidos em um dado instante, e $\mathbf{h}_{j,c} = [h_{j,1,c} \ h_{j,2,c} \ \cdots \ h_{j,M,c}]^T$ é o vetor de canal complexo referente ao EU j da célula CoMP c definido em \mathbb{C}^M .

O modelo do enlace direto descreve o vetor de sinal recebido, $\mathbf{y}_c = [y_{1,c} \ y_{2,c} \ \cdots \ y_{j,c} \ \cdots \ y_{J^*,c}] \in \mathbb{C}^{J^*}$, na célula CoMP c :

$$\mathbf{y}_c = \mathbf{H}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{z}_c + \mathbf{n}, \quad (3.2)$$

onde $\mathbf{x}_c = [x_{1,c} \ x_{2,c} \ \cdots \ x_{m,c} \ \cdots \ x_{M,c}]^T \in \mathbb{C}^M$ denota o vetor de sinal transmitido, $\mathbf{z}_c = [z_{1,c} \ z_{2,c} \ \cdots \ z_{j,c} \ \cdots \ z_{J^*,c}]^T \in \mathbb{C}^{J^*}$ denota a parcela de interferência proveniente de fonte externa à célula CoMP c , e $\mathbf{n} = [n_1 \ n_2 \ \cdots \ n_j \ \cdots \ n_{J^*}]^T \in \mathbb{C}^{J^*}$ denota ruído branco gaussiano aditivo, AWGN (do inglês, *additive white Gaussian noise*), com média zero e variância σ_η^2 .

Há várias possibilidades de se extrapolar essa aplicação primária: as antenas podem ainda estar co-localizadas ou distribuídas geograficamente e a comunicação pode ser estabelecida de múltiplos pontos a múltiplos pontos. O livro de Tse & Viswanath (2005), por exemplo, descreve minuciosamente essas e outras possibilidades de aplicações.

Na transmissão multiusuário, cada antena receptora pertence a um EU diferente e receberá sinais provenientes dos vários pontos de transmissão participantes da coordenação. O formatador de feixe fica encarregado de separar os sinais destinados a cada um dos múltiplos usuários. Sejam $s_{j,c}$, $\mathbf{w}_{j,c}$ e $p_{j,c}$, respectivamente, o símbolo, o vetor formatador e o fator de escala da potência de transmissão referentes ao EU j da

célula CoMP c . Define-se então o sinal transmitido $\mathbf{x}_c = \sum_{j \in \mathcal{J}^*} \sqrt{P_{j,c}} \mathbf{w}_{j,c} s_{j,c}$. Assim, a partir de (3.2), o sinal recebido pelo EU j da célula CoMP c pode ser expresso como:

$$y_{j,c} = \underbrace{\sqrt{P_j} \mathbf{h}_{j,c}^T \mathbf{w}_{j,c} s_j}_{d_{j,c}} + \underbrace{\sum_{\substack{j'=1 \\ j' \neq j}}^{J^*} \sqrt{P_{j',c}} \mathbf{h}_{j',c}^T \mathbf{w}_{j',c} s_{j',c}}_{z_{j,c}^{\text{intracelular}}} + \underbrace{\sum_{\substack{c'=1 \\ c' \neq c}}^C \sum_{j' \in \mathcal{J}^*} \sqrt{P_{j',c'}} \mathbf{h}_{j',c'}^T \mathbf{w}_{j',c'} s_{j',c'}}_{z_{j,c}^{\text{intercelular}}} + n_j, \quad (3.3)$$

onde $z_{j,c}^{\text{intracelular}}$ e $z_{j,c}^{\text{intercelular}}$ são, respectivamente, as parcelas da interferência intracelular e intercelular afetando o EU j na célula CoMP c , e $d_{j,c}$ se refere à parcela do sinal puramente de interesse. Assim, a relação sinal-ruído mais interferência SINR (do inglês, *signal-to-interference plus noise ratio*), $\gamma_{j,c}$, percebida pelo mesmo EU será:

$$\gamma_{j,c} = \frac{|d_{j,c}|^2}{|z_{j,c}^{\text{intracelular}} + z_{j,c}^{\text{intercelular}}|^2 + \sigma_\eta^2}. \quad (3.4)$$

Yoo & Goldsmith (2006) mostram que o formatador de feixe *zero-forcing* (ZF), mesmo sub-ótimo, é capaz de alcançar a mesma taxa agregada assintótica da solução ótima – *dirty-paper coding* [Costa 1983]– quando o número de usuários vai a infinito. O ZF é uma abordagem sub-ótima em que os vetores formatadores são selecionados de tal modo a satisfazer a condição de interferência intracelular nula, i.e. $\mathbf{h}_{j,c}^T \mathbf{w}_{j',c} = 0$ para todo $j' \neq j$. No intuito de servir simultaneamente o maior número possível de EUs, considere que $J^* = M$. Assim, o pré-codificador ZF linear pode ser realizado simplesmente por:

$$\mathbf{W}_c = \mathbf{H}_c^{-1}, \quad (3.5)$$

onde $\mathbf{W}_c = [\mathbf{w}_{1,c} \ \cdots \ \mathbf{w}_{j,c} \ \cdots \ \mathbf{w}_{J^*,c}]$. Contudo, vale salientar que a proposta introduzida neste capítulo, em sua essência, é possivelmente extensível a outros tipos de pré-codificadores.

Admitindo-se que a componente da interferência total recebida, $z_{j,c}^{\text{intracelular}} + z_{j,c}^{\text{intercelular}}$, apresente distribuição normal com média zero para este e apenas este capítulo, a expressão da taxa agregada assintótica de Yoo & Goldsmith pode ser adaptada para:

$$R = M \log_2 \left(1 + \frac{\log_2(J) \sum_{j \in \mathcal{J}^*} \gamma_{j,c}}{M} \right) \quad (3.6a)$$

$$= M \log_2 \left(1 + \log_2(J) \bar{\gamma}_{j,c} \right), \quad (3.6b)$$

onde $\bar{\gamma}_{j,c} = \frac{\sum_{j \in \mathcal{G}^*} \gamma_{j,c}}{M}$.

Na derivação desse limite, Yoo & Goldsmith (2006) supõem que a alocação de potência para cada EU é realizada de maneira ótima, obtida por *waterfilling*, e que o grande número de usuários permita encontrar um subgrupo muito próximo da ortogonalidade mútua. Os vetores dos canais de um grupo de EUs são sucessivamente projetados no espaço nulo dos canais dos EUs previamente selecionados [Tejera et al. 2006, Yoo & Goldsmith 2006, Batista 2011, Maciel 2008], conforme descrito no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 Escalonamento baseado em projeções sucessivas [Yoo & Goldsmith 2006].

Passo 1: Inicialização: $\mathcal{T}_1 = \{1, 2, \dots, J\}$; $i = 1$; e $\mathcal{S}_0 = \emptyset$;

Passo 2: Cálculo de \mathbf{t}_j , como a componente de \mathbf{h}_j ortogonal ao subespaço $\{\mathbf{t}_{(1)}, \dots, \mathbf{t}_{(i-1)}\}$, para todo $j \in \mathcal{T}_i$:

$$\mathbf{t}_j = \mathbf{h}_j \left(\mathbf{I} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\mathbf{t}_{(j)} \mathbf{t}_{(j)}^H}{\|\mathbf{t}_{(j)}\|^2} \right);$$

Passo 3: Seleciona o melhor usuário na i -ésima iteração:

$$\pi(i) = \arg \max_{j \in \mathcal{T}_i} \{\|\mathbf{t}_j\|\};$$

$$\mathcal{S}_0 \leftarrow \mathcal{S}_0 \cup \{\pi(i)\};$$

$$\mathbf{h}_{(i)} = \mathbf{h}_{\pi(i)};$$

$$\mathbf{t}_{(i)} = \mathbf{t}_{\pi(i)};$$

Passo 4: Se $|\mathcal{S}_0| < M$, o conjunto de usuários semi-ortogonais a $\mathbf{t}_{(i)}$ é calculado por:

$$\mathcal{T}_{i+1} = \left\{ j \in \mathcal{T}_i, \quad j \neq \pi(i) \quad : \quad \frac{|\mathbf{h}_j^H \mathbf{t}_{(i)}|}{\|\mathbf{h}_j\| \|\mathbf{t}_{(i)}\|} < \alpha \right\};$$

$$i \leftarrow i + 1;$$

onde α é uma constante pequena e positiva;

Passo 5: Se ainda $|\mathcal{S}_0| < M$, retorna ao **Passo 2**, caso contrário, para.

Considerando que os **Passos 2** ao **5** são executados no máximo M vezes, e no **Passo 2** ocorre uma multiplicação entre vetor e matriz [Yoo & Goldsmith 2006], a complexidade dessa busca computacional é dada por $O(M^o \sum_{i=1}^M |\mathcal{T}_i|)$, onde o é o expoente da complexidade computacional da técnica de multiplicação matricial

empregada; tipicamente $o = 2$ [Hunger 2007].

3.2 Agrupamento dos Múltiplos Pontos

Dividir o conjunto \mathcal{M} com todos os pontos de transmissão ativos em subconjuntos, ou *grupos* mutuamente exclusivos, pode favorecer a redução da quantidade de sinalização e da complexidade computacional. De acordo com Papadogiannis & Alexandropoulos (2010), o tamanho do subconjunto é um fator comum que afeta todas as três facetas da complexidade de coordenação mencionadas no início do capítulo.

Dentro da célula CoMP são formados K grupos, cada um dos quais compreendendo um subconjunto disjunto de PTs e outro subconjunto disjunto de EUs a serem servidos. Os subconjuntos de índices de PTs e de EUs associados ao grupo k são, respectivamente, \mathcal{M}_k e \mathcal{J}_k , cujas cardinalidades são M_k e J_k . Definem-se também os subconjuntos de EUs a serem preferencialmente servidos como $\mathcal{J}_k^\star \subseteq \mathcal{J}_k$.

Seja \mathcal{K} o conjunto com todos os $k = 1, \dots, K$ índices de grupo. Para cada grupo $k \in \mathcal{K}$, o grupo de PTs em \mathcal{M}_k servirá os EUs $j \in \mathcal{J}_k^\star$. Esse tipo de abordagem equivale ao particionamento espacial da célula CoMP, em termos de seus recursos de rádio, conforme ilustrado na Figura 3.4. Em cada um dos grupos coordenados resultantes do particionamento procede-se independentemente com a alocação de recursos e transmissão, tal como discutido na seção 3.1. Em seguida, apontam-se as principais diferenças no tocante à complexidade de coordenação e à capacidade.

3.2.1 Complexidade de coordenação

O sistema CoMP não agrupado requer a estimação atualizada e periódica da matriz \mathbf{H}_c para que o pré-codificador possa ser calculado. Com o agrupamento e a independência no processamento de cada grupo, a pré-codificação em cada grupo k requererá a matriz de canal correspondente, $\mathbf{H}_{c,k}$. Seguindo as mesmas suposições feitas na seção 3.1, obtém-se que, à semelhança de \mathbf{H}_c , a matriz $\mathbf{H}_{c,k}$ também seja quadrada e complexa, porém com tamanho M_k . Entretanto, antes do escalonamento, é preciso reportar estimativas envolvendo todos os potenciais EUs, resultando em uma matriz complexa com dimensões $J_k \times M_k$. Isso resultará em uma quantidade de sinalização dada por $2J_k \times M_k$ valores reais.

Assim, a quantidade relativa de sinalização requerida com o agrupamento dos

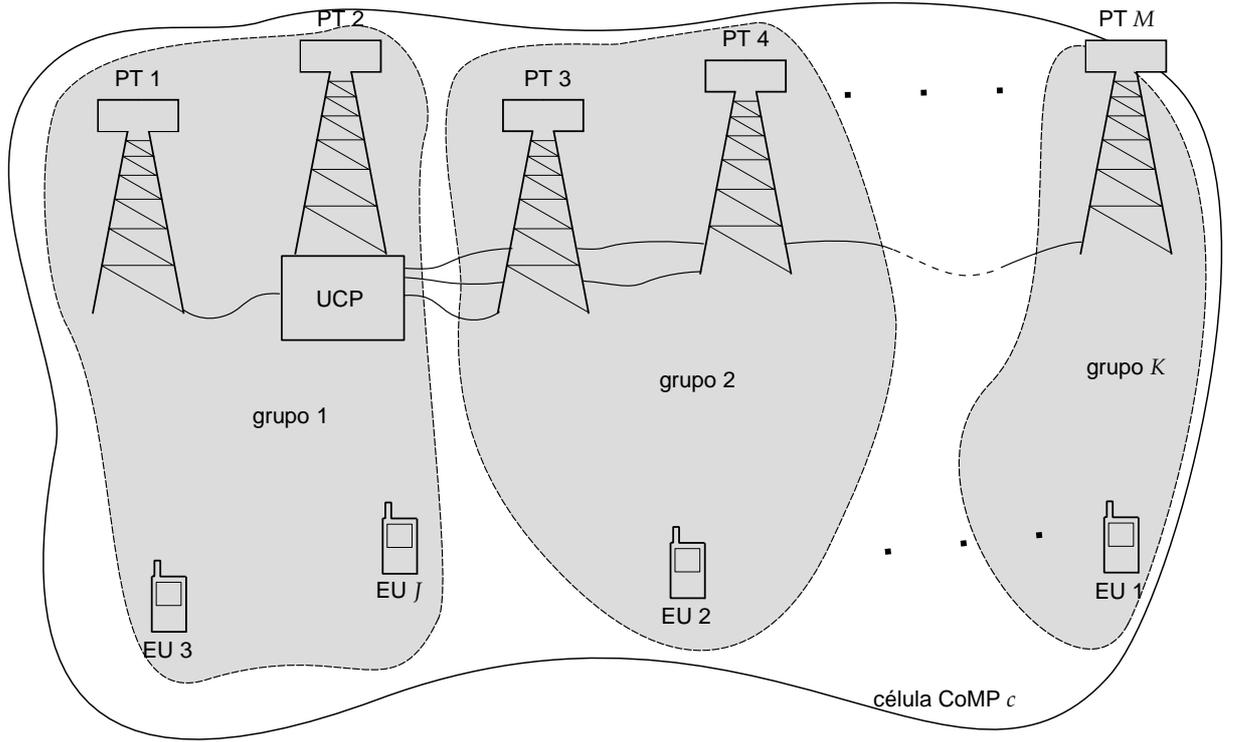


Figura 3.4: Modelo da célula CoMP adotado com K grupos formados.

múltiplos pontos, Ψ , pode ser dada por:

$$\Psi = \frac{\psi + \sum_{k \in \mathcal{K}} 2J_k M_k}{2JM}, \quad (3.7)$$

onde ψ se refere à quantidade de sinalização que porventura possa ser requerida para a formação dos grupos. Note que o valor unitário de Ψ separa aumento e redução da quantidade de sinalização. O valor de ψ dependerá de particularidades do algoritmo adotado para o agrupamento bem como do cenário. Comentários sobre os valores de ψ referentes à proposta desta tese são apresentados na seção 3.4.4.

Considerando $M_k = M/K$ e $J_k = J/K$ como sendo os valores esperados para o tamanho dos grupos, (3.7) pode ser aproximada por:

$$\Psi \approx \frac{\psi}{2JM} + \frac{1}{K}. \quad (3.8)$$

Após a disponibilização das estimativas do canal, os pré-codificadores podem ser de fato calculados. Todavia, a inversão matricial requerida na expressão (3.5) impõe uma barreira à complexidade computacional. O método de eliminação de *Gauss-Jordan*, por exemplo, realiza a inversão de uma matriz com dimensões $M \times M$ às custas de $M^3 - M^2$ operações de adição e M^3 de multiplicação [Pan 1984], i.e. um total de $2M^3 - M^2$

operações de ponto flutuante⁴.

Os limitantes assintóticos⁵ da complexidade computacional, inferior, $\Omega(\cdot)$, e superior, $O(\cdot)$, aqui adotados são definidos conforme Cormen et al. (2009), em termos de conjunto de funções, como:

$$\Omega(g(n)) = \{f(n) : 0 \leq cg(n) \leq f(n), \forall n \geq n_0\},$$

e

$$O(g(n)) = \{f(n) : 0 \leq f(n) \leq cg(n), \forall n \geq n_0\},$$

onde c e n_0 são constantes positivas.

Diz-se então que a inversão matricial através do método de eliminação de *Gauss-Jordan* tem complexidade computacional assintótica, em termos de tempo de execução, de $O(M^3)$.

Para calcular a complexidade computacional resultante do agrupamento, deve-se considerar ainda a complexidade do algoritmo de formação dos grupos. Isso pode variar de abordagem para abordagem, sendo em muitos casos uma questão ainda em aberto. Uma discussão da questão específica para a proposta desta tese é desencadeada na seção 3.4.4. Para o momento, consideremos como suposição razoável que a ordem da complexidade computacional desse algoritmo seja inferior ao da inversão matricial. Desse modo, a redução da complexidade computacional obtida através do agrupamento pode ser quantificada em termos das assíntotas dos números de operações, sendo denominada complexidade computacional relativa ao método de inversão matricial, κ , e dada por:

$$\kappa = \frac{\sum_{k \in \mathcal{K}} M_k^3}{M^3}. \quad (3.9)$$

Considerando novamente $M_k = M/K$, (3.9) pode ser aproximada por:

$$\kappa \approx \frac{1}{K^2}. \quad (3.10)$$

Na Figura 3.5 ilustra-se a expressão (3.10). Note que κ sempre reduz com o aumento do

⁴Na análise de complexidade computacional considerada as operações de adição e multiplexações, reais ou complexas, são contabilizadas como uma operação de ponto flutuante cada, apesar de requererem diferentes quantidades de ciclo de máquina.

⁵No estudo da eficiência de algoritmos, *assintótico* se refere a grandes valores de M , os quais predominam sobre as constantes multiplicativas e termos de baixa ordem no cálculo exato de tempo de execução [Cormen et al. 2009].

número de grupos. Com apenas dois grupos a complexidade computacional do CoMP agrupado representa 25% do CoMP não agrupado; com cinco grupos a complexidade relativa é de apenas 4%.

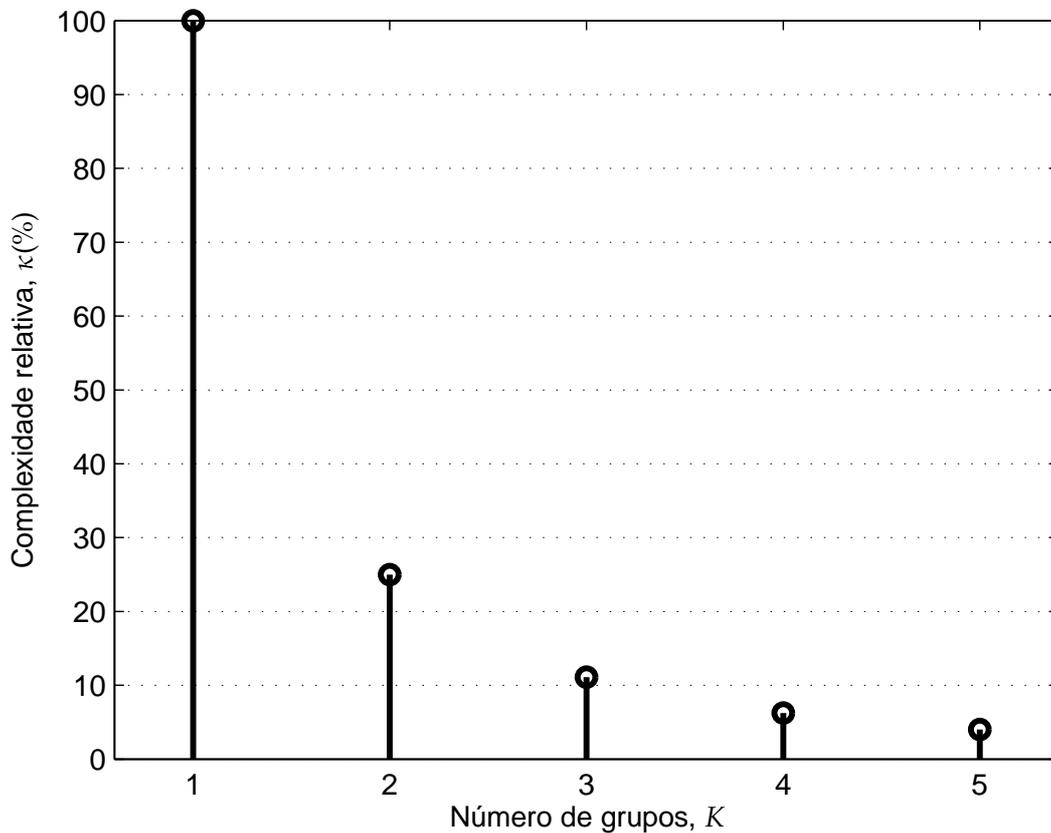


Figura 3.5: Complexidade computacional relativa em função do número de grupos.

Outros métodos, ainda que menos frequentemente adotados, podem proporcionar a inversão matricial com menor número de operações aritméticas, tais como o de *Strassen* com $O(M^{\log_2(7)})$ [Strassen 1969] e o de *Coppersmith-Winograd* com $O(M^{2.376})$ [Coppersmith & Winograd 1990]. Desse modo, a complexidade computacional relativa pode reduzir-se a até $\kappa \approx \frac{1}{K^{1.376}}$ através do agrupamento. Discussões em torno dos métodos existentes para inversão matricial podem ser obtidos na literatura científica especializada [Pan 1984, Bailey & Ferguson 1988]. Por questões de simplicidade de notação e sem perda de generalidade, a complexidade computacional de $O(M^3)$ será adotada como referência para o restante deste capítulo.

Há redução adicional de complexidade computacional no processamento do escalonamento dos EUs através de projeções sucessivas dos canais (vide 3.1.1). A complexidade relativa do escalonamento por projeções sucessivas será denotada por

κ_{ps} :

$$\kappa_{ps} = \frac{\sum_{k \in \mathcal{K}} M_k^2 \sum_{i=1}^{M_k} |\mathcal{T}_i|}{M^2 \sum_{i=1}^M |\mathcal{T}_i|}. \quad (3.11)$$

Para encontrar uma aproximação para κ_{ps} nos mesmo moldes de (3.8) e (3.10), considera-se o valor esperado $J_k^* = J^*/K$, bem como a relação entre os valores médios dos tamanhos dos grupos ao longo das iterações do escalonador, dada por $|\overline{\mathcal{T}}|_{\text{não agrupado}} \approx K|\overline{\mathcal{T}}|_{\text{agrupado}}$, onde $|\overline{\mathcal{T}}|_{\text{não agrupado}} = \frac{\sum_{i=1}^M |\mathcal{T}_i|}{M}$ e $|\overline{\mathcal{T}}|_{\text{agrupado}} = \frac{\sum_{i=1}^{M_k} |\mathcal{T}_i|}{M_k}$. Considera-se ainda o valor esperado $M_k = M/K$. Desse modo,

$$\begin{aligned} \kappa_{ps} &\approx \frac{K \left(\frac{M}{K}\right)^2 \left(\frac{M}{K}\right) |\overline{\mathcal{T}}|_{\text{agrupado}}}{(M)^2 M |\overline{\mathcal{T}}|_{\text{não agrupado}}} \\ &\approx \frac{|\overline{\mathcal{T}}|_{\text{agrupado}}}{K^2 |\overline{\mathcal{T}}|_{\text{não agrupado}}} \\ &\approx \frac{1}{K^3}. \end{aligned} \quad (3.12a)$$

3.2.2 Taxa agregada

O cálculo do valor assintótico de taxa agregada expresso em (3.6a) pode ser adaptado ao caso com agrupamento, em K grupos, como:

$$R_{\mathcal{K}} = \sum_{k \in \mathcal{K}} M_k \log_2 \left(1 + \frac{\log_2(J_k) \sum_{j \in \mathcal{J}_k^*} \gamma_{j,c,k}}{M_k} \right), \quad (3.13)$$

e, considerando os valores esperados $M_k = M/K$ e $J_k = J/K$, (3.13) pode ser aproximada por:

$$R_{\mathcal{K}} \approx M \log_2 \left(1 + \log_2 \left(\frac{J}{K} \right) \bar{\gamma}_{j,c,k} \right), \quad (3.14)$$

onde

$$\bar{\gamma}_{j,c,k} = \frac{\sum_{j \in \mathcal{J}_k^*} \gamma_{j,c,k}}{M_k}. \quad (3.15)$$

A equação (3.14) diferencia-se de (3.6b) pela constante K no denominador do argumento da função logarítmica interna e pela relação *signal-to-interference plus noise ratio* (SINR), que agora é indexada também pelo grupo, sendo expressa como:

$$\gamma_{j,c,k} = \frac{|d_{j,c,k}|^2}{\left| z_{j,c,k}^{\text{intragrupo}} + z_{j,c,k}^{\text{intergrupo}} + z_{j,c,k}^{\text{intercelular}} \right|^2 + \sigma_{\eta}^2}, \quad (3.16)$$

sendo cada um dos termos dado por:

$$d_{j,c,k} = \sqrt{P_{j,c,k}} \mathbf{h}_{j,c,k}^T \mathbf{w}_{j,c,k} s_{j,c,k} \quad (3.17a)$$

$$z_{j,c,k}^{intragrupo} = \sum_{\substack{j' \in \mathcal{J}_k^* \\ j' \neq j}} \sqrt{P_{j',c,k}} \mathbf{h}_{j',c,k}^T \mathbf{w}_{j',c,k} s_{j',c,k} \quad (3.17b)$$

$$z_{j,c,k}^{intergrupo} = \sum_{\substack{k' \in \mathcal{K} \\ k' \neq k}} \sum_{j' \in \mathcal{J}_k^*} \sqrt{P_{j',c,k'}} \mathbf{h}_{j',c,k'}^T \mathbf{w}_{j',c,k'} s_{j',c,k'} \quad (3.17c)$$

$$z_{j,c,k}^{intercelular} = \sum_{\substack{c'=1 \\ c' \neq c}}^C \sum_{k' \in \mathcal{K}} \sum_{j' \in \mathcal{J}_k^*} \sqrt{P_{j',c',k'}} \mathbf{h}_{j',c',k'}^T \mathbf{w}_{j',c',k'} s_{j',c',k'}. \quad (3.17d)$$

Enquanto que para o CoMP não agrupado a parcela da SINR (3.4) referente à interferência intracelular ($z_{j,c}^{intracelular}$) é nula, para o caso CoMP agrupado (3.16), tão somente a parcela devida à interferência intragrupo ($z_{j,c,k}^{intragrupo}$) o será. Assim, o agrupamento dos pontos de transmissão de um sistema CoMP cria uma parcela de interferência adicional dentro da célula CoMP: a interferência intergrupo.

3.3 Abordagens Existentes

Tradicionalmente, as abordagens para formação dos grupos de pontos de transmissão são divididas entre estáticas (e.g., [Boccardi & Huang 2007]) e dinâmicas (e.g., [Papadogiannis et al. 2008, Papadogiannis & Alexandropoulos 2010]), dependendo do quão frequente se dão as mudanças na composição dos grupos. A literatura possui ainda alguns trabalhos que se utilizam de uma abordagem intermediária, a semi-dinâmica (e.g., [Huang et al. 2010]); contudo, esta consiste na vertente menos representativa.

O agrupamento estático consiste na abordagem mais simples, a qual requer um agrupamento fixo de pontos de transmissão baseado, por exemplo, em suas posições e nos padrões de radiação de suas antenas. Na abordagem semi-dinâmica, os grupos ainda são fixos de acordo com configurações prévias, sendo que essas configurações estão disponibilizadas em múltiplas camadas. Assim, o mesmo EU que se encontra na borda de um grupo coordenado segundo uma dada camada de configuração, pode se encontrar no centro de outro grupo coordenado segundo outra camada de configuração. Já, na abordagem dinâmica, a forma dos grupos pode se adaptar às atuais condições

de canal e carga, dessa maneira permitindo uma melhor exploração da diversidade espacial macroscópica. Ainda assim, os algoritmos até então disponíveis – e.g., em Papadogiannis et al. (2008) e Papadogiannis & Alexandropoulos (2010) – apresentam algumas características que podem dificultar sua execução em tempo real, tais como restrição do tamanho do grupo e dispendiosa busca por configurações.

O processo de formação dos grupos envolve a seleção de pontos de transmissão e está fortemente relacionado ao escalonamento dos EUs e da transmissão coordenada. A solução proposta em Papadogiannis et al. (2008) depende de uma vasta e sequencial combinação dos pontos de transmissão candidatos, o que acaba favorecendo os primeiros grupos formados. Além do mais, para cada combinação testada, o escalonamento bem como os pré-codificadores ZF devem ser dispendiosamente computados para determinação da taxa total agregada. Diferentemente, o algoritmo proposto por Papadogiannis & Alexandropoulos (2010) baseia-se em uma medida de longo termo da *channel state information* (CSI), requerendo uma busca exaustiva sobre todas as possibilidades de formação dos grupos. Recentemente, Baracca et al. (2012) restringiram o espaço de busca para PTs imediatamente vizinhos, além de desassociarem do escalonador, dentre outras contribuições. Ainda assim, a avaliação de cada grupo candidato baseia-se no cômputo dos pré-codificadores.

3.4 Proposta de um Novo Método de Agrupamento dos Múltiplos Pontos

Como mencionado anteriormente, a complexidade computacional imposta pelos métodos que agrupam diretamente os pontos de transmissão se mostra desencorajadora para aplicações em tempo real. Em seguida, apresenta-se de maneira intuitiva a ideia de um novo método em que o agrupamento dos pontos de transmissão se dá de maneira indireta.

A ideia-chave da aplicação a ser aqui descrita se concentra na maneira como cada EU – mediante seu conjunto formado pela antena e circuito elétrico receptores – percebe os vários pontos de transmissão. Isto é, a observação de como cada PT pode prover cada EU é o ponto de partida da ideia. A título de ilustração, consideremos uma célula CoMP de um sistema hipotético, com número indefinido de EUs, porém dotado apenas de cinco pontos de transmissão, referenciados simplesmente por A, B, C, D e E.

A Figura 3.6 traz uma simples representação dessa célula CoMP, na qual apenas dois EUs estão presentes. Admitamos ainda que cada um desses EUs seja capaz de separar os sinais recebidos provenientes de cada um dos pontos de transmissão, de tal modo que sua FSR possa ser estimada. No exemplo ilustrado, o EU 1 identificou que o sinal proveniente do ponto de transmissão A é o recebido com maior intensidade, seguido pelos sinais provenientes dos pontos de transmissão D e E. Já, os sinais provenientes dos demais pontos de transmissão (viz. B e C) são relativamente desprezíveis para esse usuário. Contrastantemente, o EU 2 tem o ponto de transmissão B como o mais adequado, seguido de perto pelo ponto de transmissão C, enquanto os pontos de transmissão A, D e E providenciam sinais que chegam ao receptor com intensidades muito baixas.

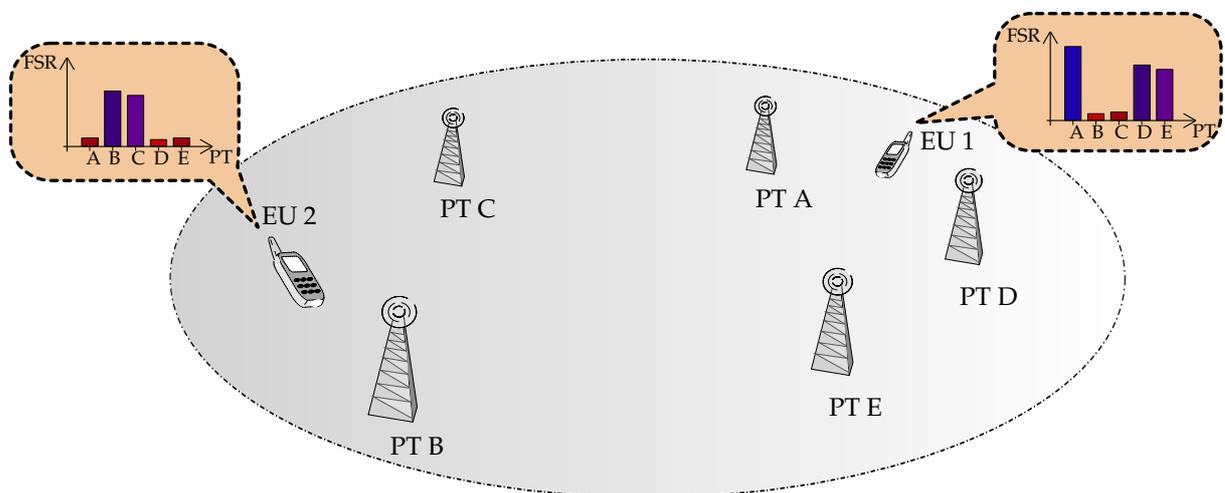


Figura 3.6: Célula CoMP de um sistema CoMP hipotético com cinco PTs e dois EUs.

Surge então uma série de questionamentos a respeito de como aproveitar o sistema CoMP. Seria mais apropriado o ponto de transmissão A servir o EU 1 e o ponto de transmissão B servir o EU 2 ou seria mais apropriado ambos os pontos de transmissão se coordenarem para servir os dois usuários? E quanto a incluir os demais pontos de transmissão (viz. C, D e E)?

É sabido que o processamento conjunto pode prover os melhores resultados em termos de eficiência espectral, entretanto o processamento conjunto é também aquele que demanda a maior quantidade de sinalização bem como a maior complexidade para configurar a transmissão. No outro extremo, o escalonamento coordenado alivia a complexidade de coordenação ao preço de uma menor eficiência espectral. Quão maior o arranjo MIMO macroscópico, maior a capacidade, porém maior também a complexidade de coordenação. Portanto, as respostas para os questionamentos acima

seriam dadas em conformidade com as prioridades elegidas pelo operador da rede.

Levando-se em conta a mobilidade dos usuários bem como a alta taxa de utilização dos sistemas celulares, pode-se tirar proveito da diversidade multiusuário. Suponha que a carga oferecida à célula CoMP da Figura 3.6 seja triplicada, conforme exemplificado na Figura 3.7. Nesse caso surgiram EUs novos próximos a cada um dos dois EUs até então considerados. EUs muito próximos tendem a perceber os pontos de transmissão de maneira muito similar, obtendo valores de FSR muito parecidos para o mesmo ponto de transmissão. Por consequência, os vetores de força também tendem a ser muito similares. Porém, EUs afastados entre si apresentam combinações de distâncias aos pontos de transmissão distintas, e assim, vetores de força dissimilares.

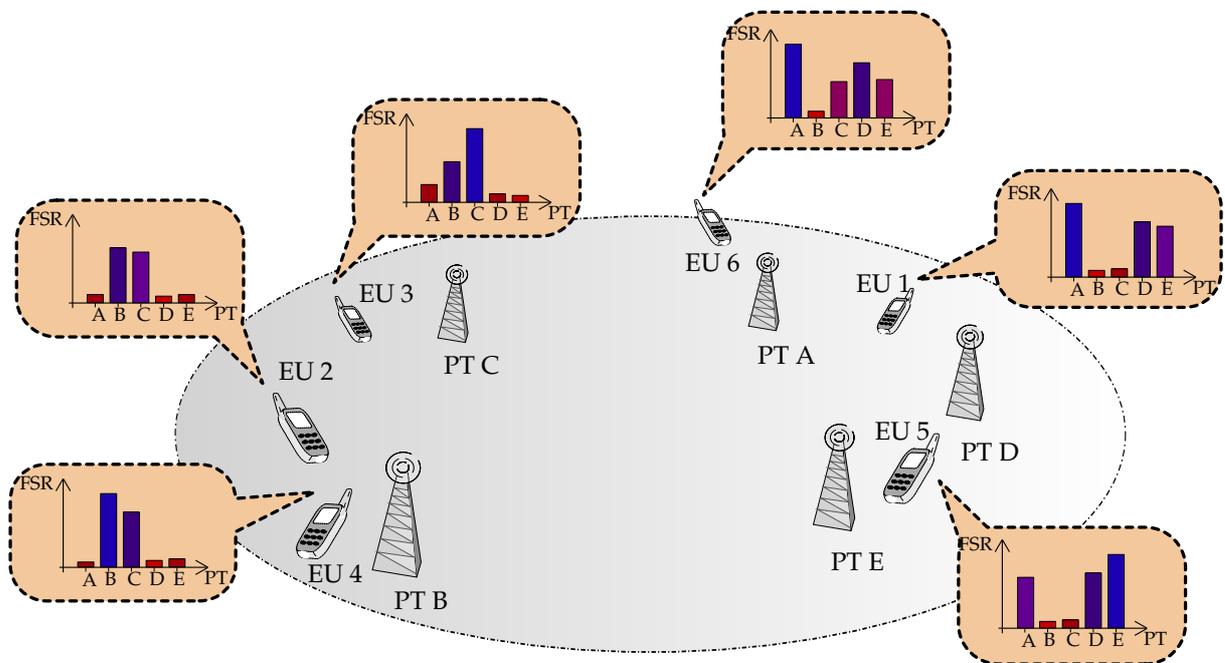


Figura 3.7: Célula CoMP de um sistema CoMP hipotético com cinco PTs e seis EUs.

As vantagens do processamento conjunto podem não se confirmar para esses casos em que os EUs tenham vetores de força dissimilares. No exemplo mostrado na Figura 3.7, pode-se pressupor que a contribuição dos pontos de transmissão B e C ao EU 1 e a seus vizinhos seja desprezível. A distância desses enlaces provavelmente requer um considerável aumento na potência de transmissão de B e C – se comparada à potência requerida para transmitir apenas para o EU 2 –, acarretando em maior vazamento da potência para as células CoMP vizinhas.

Por esse motivo que o agrupamento é visto como uma abordagem atraente para

sistemas CoMP em que a complexidade de coordenação deve ser amenizada sem desperdiçar muito as vantagens oferecidas pela estrutura MIMO macroscópica.

Nesse último exemplo, pode-se comparar todos os vetores de força e agrupá-los conforme semelhança. A Figura 3.8(a) ilustra uma possível configuração desse grupos. Agruparam-se os EUs cujos vetores de força são similares, resultando em EUs 2, 3 e 4 formando o primeiro grupo, e EUs 1 e 5 formando o segundo grupo. O EU 6 tem vetor de força ligeiramente similar a 1 e 5, entretanto, acaba sendo o mais destoante, e, portanto, foi isolado. Por questão de generalidade, pode-se considerar que o EU 6 componha um terceiro grupo.

Cada um desses grupos pode ser servido, independentemente dos demais, de várias maneiras, agrupando-se agora os pontos de transmissão, como ilustrado na Figura 3.8(b). Por exemplo, analisando-se o grupo de vetores de força dos EUs componentes do primeiro grupo, pode-se notar que os pontos de transmissão A, D e E apresentam menor importância que B e C. Portanto, os pontos de transmissão B e C são agrupados.

Analisando-se o segundo grupo de EUs, todos os pontos de transmissão restantes se mostram importantes, porém, o EU 6 não seria servido. Dependendo dos critérios de desempenho do sistema, talvez seja mais apropriado agrupar os pontos de transmissão D com E e isolar o ponto de transmissão A. Talvez seja ainda mais apropriado reconsiderar o agrupamento de vetores de força de modo a incluir o EU 6 no mesmo grupo dos EUs 1 e 5, e conseqüentemente, servi-los conjuntamente através dos pontos de transmissão A, D e E. Ou seja, existe uma certa liberdade na determinação dos grupos.

Contudo, a realização do agrupamento de maneira eficiente pode não ser tão simples quanto no exemplo ilustrado, sobretudo quando consideradas proporções mais realistas para o sistema. Tipicamente têm-se dezenas de pontos de transmissão e centenas ou mesmo milhares de usuários ativos. Assim uma maneira mais expedita de agrupar os pontos de transmissão passa a ser de grande interesse. Por esse motivo, propõe-se aqui um método auto-organizado de agrupamento, conforme descrito nas seções a seguir.

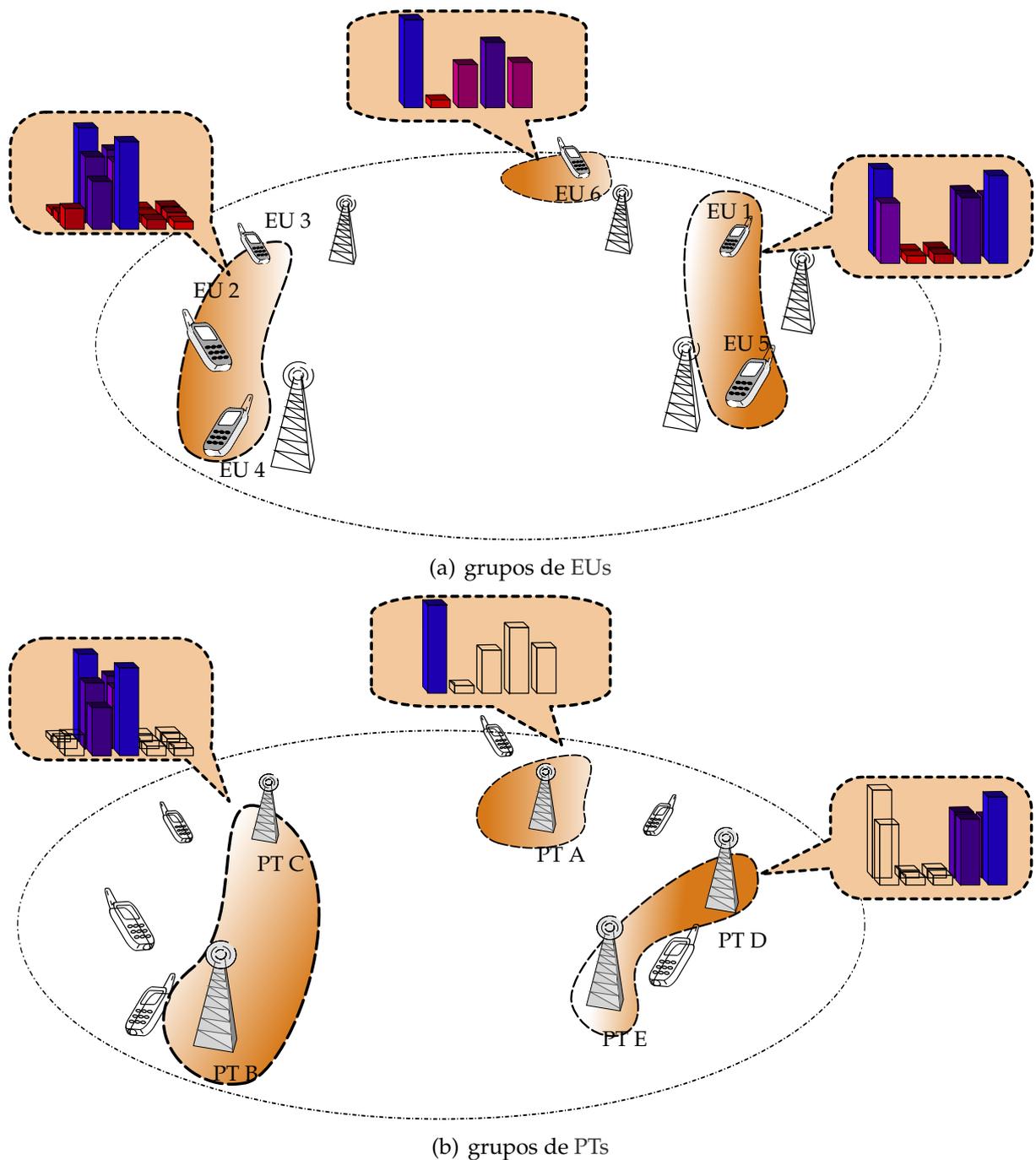


Figura 3.8: Formação de três grupos na célula CoMP de um sistema CoMP hipotético.

3.4.1 Método de agrupamento auto-organizado

Para lidar com o agrupamento dos pontos de transmissão, aqui se adotou método homônimo proveniente da aprendizagem de máquinas [Alpaydin 2010]. Agrupamento é um método adequado a promover a atribuição ou assinalamento de um conjunto de observações com base no aprendizado auto-organizado, i.e. sem a supervisão de um tutor. Os grupos devem ser bem separados e homogêneos. Separabilidade significa que

entidades pertencentes a diferentes grupos devem ser as mais dissimilares possíveis. Homogeneidade significa que entidades assinaladas a um mesmo grupo apresentam algum tipo de similaridade entre si.

A literatura especializada é vasta em termos de tipos de agrupamento – e.g. arbitrário, particionamento, empacotamento, cobrimento, hierárquico – bem como de critérios de homogeneidade e separabilidade – e.g. soma dos erros quadráticos, variância, raio contínuo, estrela contínua – [Hansen & Jaumard 1997]. Este trabalho não tem o intuito de detalhar os métodos de agrupamento disponíveis, mas sim descrever a aplicação de uma das versões do método para o problema de agrupamento de pontos de transmissão. Um tutorial com rigoroso levantamento bibliográfico do assunto pode ser obtido do artigo de Hansen & Jaumard (1997). Explicações mais didáticas podem ser encontradas em diversas outras referências, tais como em Bishop (2006) e em Haykin (2008).

Método e critério aqui adotados foram escolhidos com base nas características do problema. Como a participação de um mesmo ponto de participação em dois grupos é intratável segundo as estratégias de processamento conjunto tradicionais, bem como o uso de todos os pontos de transmissão é desejável, o agrupamento por particionamento mostra-se ser o mais adequado.

Particionamento é um dos tipos mais usados de agrupamento, o qual não permite grupos vazios nem sobrepostos, e ainda a união dos grupos deve resultar no conjunto de onde originou o agrupamento. O critério de agrupamento escolhido foi o da soma dos erros quadráticos, por expressar tanto a homogeneidade quanto a separabilidade. Além disso, é um dos critérios mais bem estudados.

Conforme ilustrado anteriormente, o agrupamento parte do conjunto de vetores de força. Seja $\mathbf{v}_{j,c}$ o vetor de força do sinal associado ao EU j dentro da célula CoMP c , com comprimento M . Cada um desses vetores é tomado como uma simples observação. Cada EU tem uma e apenas uma observação associada. Entretanto, não necessariamente todas as observações devem ser levadas em conta. Caso haja usuários que saibamos *a priori* que não devam participar do escalonamento, suas observações podem ser descartadas já neste estágio, evitando sobrecarga desnecessária ao algoritmo proposto na próxima seção. Seja \mathcal{U} o conjunto de todos os EUs presentes na célula CoMP c . A partir desses, pode-se previamente selecionar um conjunto \mathcal{J} dos EUs a serem considerados pelo algoritmo de assinalamento, i.e. $\mathcal{J} \subseteq \mathcal{U}$, cuja cardinalidade é definida por $J = |\mathcal{J}| \leq |\mathcal{U}|$. Essas J observações são dispostas no espaço \mathbb{R}^M e estão

particionadas em K grupos, conforme os subconjuntos \mathcal{J}_k para todo $k \in \mathcal{K}$.

O número de grupos K pode variar no tempo e ao longo das várias células CoMP. Não obstante, visto que a partir daqui nossa discussão restringir-se-á a uma única célula CoMP c , por simplicidade de notação, pode-se omitir o índice c , i.e. $\mathbf{v}_{j,c} = \mathbf{v}_j$.

Seja \mathcal{V} o conjunto com os vetores de força v_j para todo $j \in \mathcal{J}$. Cada agrupamento resultará em subconjuntos dessas observações, \mathcal{V}_k , para todo $k \in \mathcal{K}$, disjuntos entre si, tal que:

$$\mathcal{V} = \bigcup_{k=1}^K \mathcal{V}_k, \quad (3.18a)$$

$$\mathcal{V}_{k_1} \cap \mathcal{V}_{k_2} = \emptyset, \quad \forall \mathcal{V}_{k_1}, \mathcal{V}_{k_2} \in \mathcal{V} : k_1 \neq k_2, \quad (3.18b)$$

$$\mathcal{V}_k \neq \emptyset, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (3.18c)$$

e uma instância de formação de grupo é denotada por $\mathcal{S} = \{\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, \dots, \mathcal{V}_K\}$. Não necessariamente as cardinalidades $|\mathcal{V}_k|$ devem ser as mesmas.

Os grupos são formados de modo a minimizar a soma interna das distâncias quadráticas aos centroides:

$$\min_{\mathcal{S}} \sum_k \sum_{\mathbf{v}_j \in \mathcal{V}_k} \|\mathbf{v}_j - \bar{\mathbf{v}}_k\|_2^2, \quad (3.19)$$

onde $\|\cdot\|_2$ denota norma euclidiana e $\bar{\mathbf{v}}_k$ é o k -ésimo vetor protótipo. Por sua vez, o k -ésimo vetor protótipo corresponde ao centroide do subconjunto de vetores de força associados ao grupo k , podendo ser expresso como:

$$\bar{\mathbf{v}}_k = \frac{\sum_{j \in \mathcal{J}_k} w_j \mathbf{v}_j}{\sum_{j \in \mathcal{J}_k} w_j}, \quad (3.20)$$

onde $w_j \in \mathbb{R}_+$ é o peso assinalado ao j -ésimo EU, conforme o quanto se queira que \mathbf{v}_j influencie o cálculo do centroide correspondente. Por exemplo, pode-se priorizar um ou mais EUs tal que o centroide correspondente se aproxime de seus vetores de força.

Para o caso particular em que não haja qualquer favorecimento a nenhum dos EUs, a equação (3.20) pode ser reescrita como:

$$\bar{\mathbf{v}}_k = \frac{1}{|\mathcal{V}_k|} \sum_{\mathbf{v}_j \in \mathcal{V}_k} \mathbf{v}_j. \quad (3.21)$$

Cada vetor protótipo $\bar{\mathbf{v}}_k$ corresponde ao vetor de força aproximado válido para

todos os $\mathbf{v}_j \in \mathcal{V}_k$. Quão mais próximos entre si forem os vetores de força dos EUs de um grupo, mais representativo para eles o vetor protótipo será. Para cada grupo k , o vetor protótipo $\bar{\mathbf{v}}_k$ será empregado para determinar o subconjunto \mathcal{M}_k de pontos de transmissão que servirão os EUs $j \in \mathcal{J}_k$. Trata-se de uma tentativa de agrupar os EUs a serem servidos sob um apropriado nível de qualidade por um mesmo subconjunto de pontos de transmissão.

Sabe-se que, se J e K são constantes, o problema de minimização da variância⁶ pode ser resolvido de maneira exata em tempo polinomial [Inaba et al. 1994]. Um dos meios para se formar os grupos pode ser obtido através do algoritmo k -médias [MacQueen 1966, Haykin 2008]. Trata-se de um algoritmo heurístico em sua essência, amplamente difundido nos mais variados ramos da Ciência e da Engenharia, apropriado principalmente para quando K é pequeno com relação ao número de observações [Hansen & Jaumard 1997].

O assinalamento das observações – de acordo com a equação (3.19) –, assim como o recálculo dos centroides – de acordo com a equação (3.20) (ou (3.21)) –, são iterativamente realizados até que algum critério de parada seja atingido. Exemplos desse critério de parada são (i) alcançar um número máximo de iterações ou (ii) chegar a um estado onde a iteração não provoque mudanças significativas na formação dos grupos.

O custo a ser minimizado em (3.19) é estritamente não crescente ao longo da execução do algoritmo k -médias [Har-Peled & Sadri 2005, Arthur & Vassilvitskii 2006]. Contudo, o tempo de convergência é imprevisível. Cabe salientar que a inicialização dos centroides exerce papel importante sobre o desempenho do algoritmo. Uma inicialização dos centroides com valores porventura muito próximos à solução ótima global irá abreviar o tempo de execução. Por outro lado, valores muito distantes podem comprometer o desempenho do algoritmo, uma vez que o algoritmo k -médias não oferece garantias de convergência ao ótimo global. Os K centroides podem ser inicializados de acordo com algumas heurísticas, tais como:

- selecionar K observações aleatoriamente;
- selecionar aleatoriamente K pontos no espaço \mathbb{R}^M , respeitando as faixas de valores permitidas (conforme o domínio definido pelas observações consideradas);

⁶A função custo do problema de minimização da variância é muito similar ao da minimização da soma interna das distâncias quadráticas aos centroides (cf. (3.19)), distinguindo-se por um denominador função da cardinalidade de cada grupo (cf. [Inaba et al. 1994]).

- utilizar centroides previamente calculados com o k-médias a partir de um diminuto subconjunto das observações.

Na literatura tem-se publicado uma variedade de deduções de limitantes inferiores e superiores para o número de iterações realizadas pelo algoritmo k-médias (vide Har-Peled & Sadri (2005) e Arthur & Vassilvitskii (2006)). A especificidade de algumas abordagens bem como a generalidade de outras acabam comprometendo a praticidade desses limitantes, chegando a ser tão amplos quanto os $\Omega(J)$ e $O(J^{KM})$, obtidos para o pior caso dentre várias tentativas de inicialização. A discrepância dos resultados teóricos frente à eficiência do algoritmo k-médias na prática é tanta que Arthur & Vassilvitskii (2006) propõem uma formalização da mesma. Considerar o número máximo de iterações como critério de parada pode ser uma abordagem razoável e simplificar esse tipo de análise, i.e. $O(M)$. Desse modo, satisfaz-se a restrição feita na seção 3.2.1 de que o algoritmo de agrupamento não deve ter complexidade superior ao da inversão matricial, mantendo válidas as expressões (3.9) e (3.10).

3.4.2 Algoritmo de assinalamento baseado em k-médias

Nesta seção descreve-se o algoritmo de assinalamento dos enlaces que toma o algoritmo k-médias como base. Por assinalamento de enlace menciona-se a associação dos conjuntos de PTs e de EUs que estarão envolvidos em uma mesma transmissão coordenada. O algoritmo de assinalamento deve ser executado pela UCP de cada célula, após a disponibilização do conjunto \mathcal{V} contendo as estimativas dos vetores de força de todos os EUs que sejam de interesse (a obtenção de \mathcal{V} é discutida na seção 3.4.3). A partir de então, o algoritmo k-médias é aplicado sobre \mathcal{V} para formar os K grupos.

Uma vez que todos os K grupos estejam adequadamente formados no espaço \mathbb{R}^M , sabem-se quais os J_k vetores de força que serão associados a cada grupo k e a partir de então o vetor protótipo $\bar{\mathbf{v}}_k$ pode ser calculado por (3.20) (ou (3.21)). Como cada vetor de força é diretamente associado a um EU, imediatamente serão conhecidos os J_k EUs a serem servidos dentro do grupo k , i.e. o subconjunto \mathcal{J}_k estará determinado.

Todos os K vetores protótipos são comparados entre si, um a um, de modo a formar \mathcal{M}_k para todo $k \in \mathcal{K}$. A maneira como assinalar cada ponto de transmissão a cada grupo pode seguir as mais diversas regras, como por exemplo, assinalar cada ponto de

transmissão m ao grupo k_m no qual apresenta o sinal mais forte, i.e.

$$k_m = \arg \max_k \{\bar{v}_k(m)\}, \quad (3.22)$$

onde o subconjunto \mathcal{M}_k será dado por $\mathcal{M}_k = \{m : k_m = k\}$ para cada $k \in \mathcal{K}$.

Nesse tipo de regra não há garantias, mínimas que sejam, a respeito dos tamanhos dos grupos. Uma regra alternativa consiste em reservar o ponto de transmissão que proporciona o sinal mais forte dentro de cada grupo, respeitando-se certa ordem entre grupos; repete-se o procedimento até que todos os pontos de transmissão estejam reservados, definindo-se assim o assinalamento.

De qualquer modo, o número M_k de pontos de transmissão assinalados a cada grupo k é independente dos outros grupos e ainda variante no tempo. Os M_k pontos de transmissão do grupo k serão empregados para realizar a transmissão coordenada e, desse modo, servir $J_k^* \leq J_k$ EUs.

O algoritmo pode ser resumido em quatro passos, conforme o Algoritmo 2.

Algoritmo 2 Algoritmo de assinalamento baseado no método k-médias.

Entradas: Todos os vetores de força em \mathcal{V} ; o número K de grupos a serem formados; e o número J_k^* de EUs a serem servidos para cada grupo $k = 1, \dots, K$.

Saídas: Os subconjuntos coordenados \mathcal{M}_k e \mathcal{J}_k^* , para todo $k \in \mathcal{K}$.

Passo 1: Aplicar o algoritmo k-médias sobre todos os vetores de força em \mathcal{V} para formar K grupos, identificando o grupo associado a cada EU j por c_j para $j = 1, \dots, J$; os EUs associados ao grupo k constituem o subconjunto \mathcal{J}_k , para todo $k \in \mathcal{K}$;

Passo 2: Calcular os vetores protótipos \bar{v}_k , para todo $k \in \mathcal{K}$;

Passo 3: Associar um grupo a cada PT m de acordo com uma regra predefinida; os pontos de transmissão associados ao grupo k constituem o subconjunto \mathcal{M}_k , para todo $k \in \mathcal{K}$;

Passo 4: Selecionar os J_k^* EUs de \mathcal{J}_k a serem preferencialmente servidos, para todo $k \in \mathcal{K}$, assim, definindo o subconjunto \mathcal{J}_k^* de EUs.

Após esse procedimento, pode-se ainda optar em habilitar todos os grupos simultaneamente, ou apenas alguns deles, alternadamente ou não. Cria-se então o subconjunto $\mathcal{K}^* \subseteq \mathcal{K}$ dos grupos habilitados. Trata-se da seleção parcial dos grupos, em contraste à seleção plena, que pode ser realizada de maneira aleatória ou seguindo

alguma heurística, tal como: (i) seleção dos grupos com os maiores (ou alternativamente menores) tamanhos; (ii) seleção dos grupos cujas somas internas das distâncias aos centroides sejam menores (ou alternativamente maiores); ou mesmo (iii) seleção dos grupos com base nos valores de silhueta⁷ de suas observações.

Uma vez determinados todos os grupos, para cada grupo habilitado $k \in \mathcal{K}^*$, uma técnica de transmissão coordenada poderá ser aplicada de modo a estabelecer a comunicação dos pontos de transmissão em \mathcal{M}_k para os EUs em \mathcal{J}_k^* . Contudo, neste trabalho, sem perda de generalidade, apenas a pré-codificação ZF é adotada.

3.4.3 Obtenção do conjunto \mathcal{V} e reportes

A obtenção do conjunto \mathcal{V} é a etapa inicial à aplicação do algoritmo descrito na seção 3.4.2. Trata-se da única entrada do algoritmo impreterivelmente dependente de estimativas. Para realizar tal estimativa, as várias entidades da célula CoMP devem interagir conforme descrito a seguir:

Passo a: via enlace direto, cada EU $j \in \mathcal{J}$ estima seu próprio vetor de força, \mathbf{v}_j ;

Passo b: via enlace reverso, cada EU $j \in \mathcal{J}$ reporta \mathbf{v}_j a ao menos um dos PTs da célula CoMP;

Passo c: via *backhaul*, cada PT $m \in \mathcal{M}$ envia \mathbf{v}_j à UCP;

Passo d: a UCP concentra todos os \mathbf{v}_j formando o conjunto \mathcal{V} .

Conforme mencionado na seção 3.1, aqui admite-se que as estimativas do canal sejam perfeitas (no **Passo a**), bem como as comunicações entre os pontos de transmissão, incluindo a UCP (no **Passo c**), e entre os pontos de transmissão e os EUs (no **Passo b**). Caso contrário, procedimento similar poderá ainda ser adotado, mas provavelmente esta notação não seja suficiente. Por exemplo, se os EUs reportam \mathbf{v}_j a mais de um PT, as múltiplas cópias de \mathbf{v}_j poderão ser apropriadamente combinadas na UCP de modo a produzir uma estimativa melhorada.

Com o conjunto \mathcal{V} devidamente obtido, o algoritmo de assinalamento pode ser executado. Em seguida, o resultado do agrupamento deve ser reportado às entidades constituintes do sistema, para que as transmissões possam então ser coordenadas.

⁷Valor de silhueta é uma medida de quão próximo cada amostra em um grupo está das amostras nos demais grupos [Rousseeuw 1987].

A Figura 3.9 ilustra o diagrama de sequência envolvido no uso do algoritmo de assinalamento proposto.

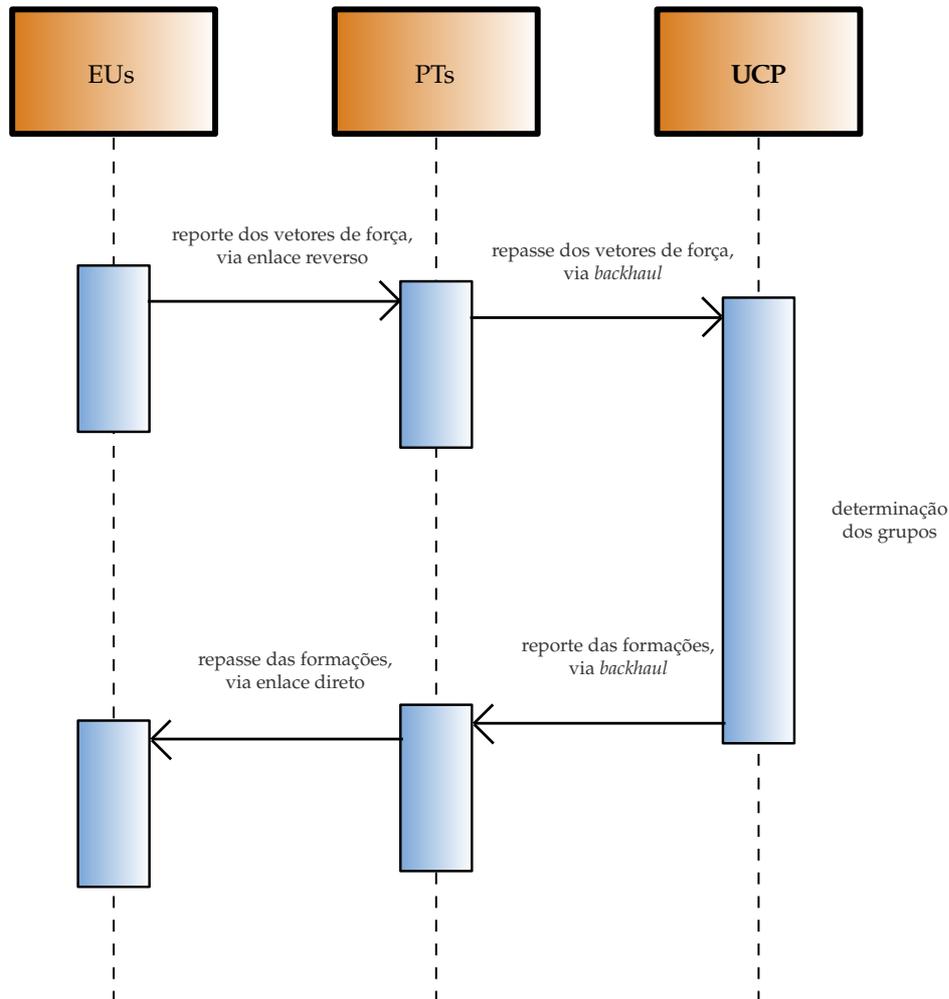


Figura 3.9: Diagrama de sequência do uso do algoritmo de assinalamento baseado no algoritmo k-médias.

Note ainda que o mesmo procedimento pode ser adotado por um sistema baseado em TDD. Caso valha a reciprocidade entre os enlaces reverso e direto, os passos de estimação e reporte dos vetores de força (viz. **Passos a e b**) são dispensados. Isso é possível pois as estimativas de FSR podem ser realizadas diretamente pelos PTs no enlace reverso e usadas para coordenação da transmissão no enlace direto.

3.4.4 Quantidade relativa de sinalização

Retomemos agora a análise da quantidade necessária de sinalização iniciada na seção 3.2.1. A rigor, $\psi = JM$ visto que tão somente valores reais são requeridos para o

funcionamento do algoritmo. Nesse caso, a aproximação (3.8) pode ser reescrita como:

$$\Psi \approx \frac{K+2}{2K}, \quad (3.23)$$

de onde obtemos que a sinalização só passa a ser reduzida para $K > 2$; para $K = 2$ a quantidade de sinalização se mantém inalterada; e para $K \leq 1$ a quantidade de sinalização acarretada pelo processo de agrupamento aumenta, entretanto, trata-se de uma configuração muito improvável. Esse comportamento é ilustrado através do gráfico na Figura 3.10. Observa-se ainda que Ψ sempre reduz com o aumento do número de grupos, chegando a 70% para $K = 5$ se comparada à ausência do algoritmo de agrupamento.

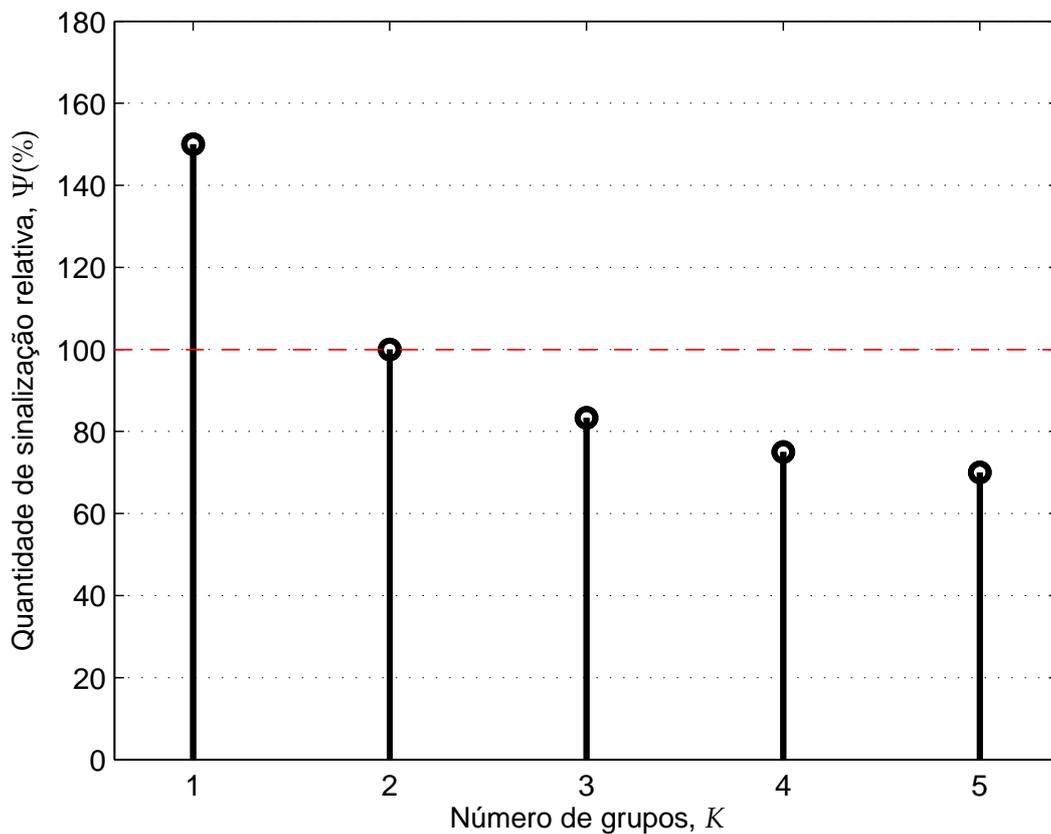


Figura 3.10: Quantidade de sinalização relativa em função do número de grupos, dado $\psi = JM$.

Entretanto, deve-se levar em conta que ψ pode ser reduzida com base em observações do cenário. Por exemplo, para um canal com baixa taxa de variação ou usuários com mobilidade limitada, a frequência das estimativas dos vetores de força pode ser reduzida. Além do mais, as estimativas provenientes de pontos de transmissão

que se sabe *a priori* serem improváveis de transmitir a um determinado usuário em um curto período tempo podem ser descartadas e, portanto, não sinalizadas. Digamos que essa quantidade de sinalização seja reduzida para $\psi = JM/4$, conforme ilustrado na Figura 3.11. Observa-se ainda que agora a quantidade de sinalização do CoMP agrupado reduz-se mesmo para $K = 2$, com Ψ em 62,5%; para $K = 5$ a quantidade de sinalização reduz-se a tão somente 32,5%.

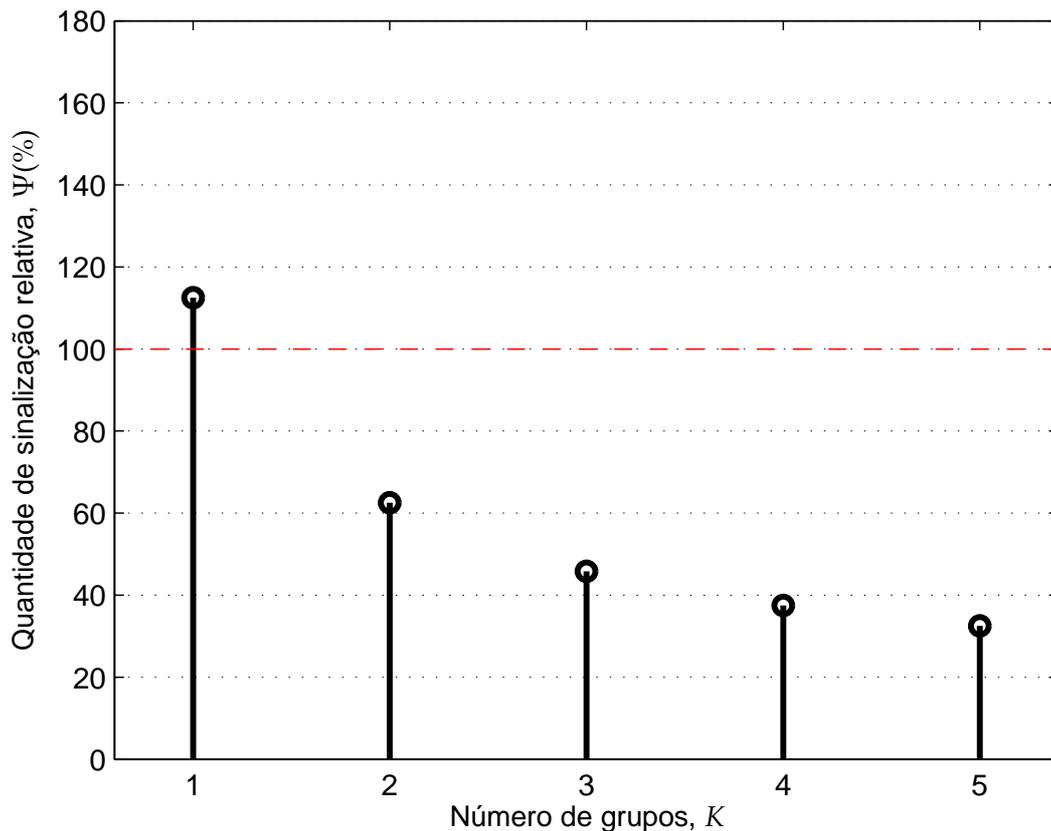


Figura 3.11: Quantidade de sinalização relativa em função do número de grupos, dado $\psi = JM/4$.

3.5 Simulação Computacional

Na última seção apresentou-se uma análise da complexidade de coordenação do algoritmo de assinalamento proposto. Entretanto, a avaliação analítica da capacidade em termos de taxa agregada deve considerar diversas variáveis, tais como potências de transmissão e de ruído térmico, modulações e codificações em uso, posicionamentos das antenas, características do canal, considerando ainda todos os PTs bem como todos os EUs que podem estar em qualquer lugar dentro da área de cobertura. Há especial

dificuldade em obter estimativas confiáveis para $z_{j,c}^{intercelular}$ e $z_{j,c,k}^{intercelular}$. Nesse caso a abordagem de avaliação através de simulação é mais apropriada.

Uma ferramenta de simulação em nível sistêmico do CoMP foi programada em ambiente *MATLAB*[®], com base nas especificações do LTE-A publicadas pelo 3GPP. Esta ferramenta foca na simulação tão somente dos canais de tráfego no enlace direto, para o qual a tecnologia OFDMA está especificada. Vale salientar, entretanto, que este estudo não se propõe a adotar o CoMP fielmente tal como especificado pelo 3GPP, mas sim adotar um modelo simples para o CoMP, cujos parâmetros escolhidos podem coincidir ou não com os adotados pelo 3GPP.

Detalhes da ferramenta de simulação estão fora do escopo deste capítulo, sendo apenas feitos breves comentários dos modelos empregados. Em seguida, descreve-se de maneira sucinta o cenário considerado.

3.5.1 Cenário

No cenário considerado tem-se um conjunto de sete ERBs compondo a célula CoMP, ao passo que um conjunto de sete células CoMP compõe o sistema. A área de cobertura associada a cada ERB é denominada célula convencional, sendo tri-setorizada conforme ilustrado na Figura 3.12. A ERB é posicionada no centro de sua célula convencional e composta por três PTs co-localizados, cada um dos quais servindo cada um dos setores de 120°. Portanto, há $M = 21$ PTs em cada uma das células CoMP. Cada setor é modelado por um hexágono com diâmetro externo de $D = 334$ m.

Um sistema como esse, modelado com um número finito de células CoMP, pode fazer com que os usuários, sobretudo aqueles nas células das extremidades do sistema sofram efeitos da descontinuidade do modelo. Para evitar tais efeitos, o modelo toroidal *wrap-around* foi adotado de modo que extremidades opostas do sistema tornem-se interligadas para as simulações [Zander et al. 2001].

O ganho do canal, $G_{j,m,c}$ em dB, do PT m ao EU j , dentro da célula CoMP c , é composto pelas componentes perda de percurso, sombreamento, ganho da antena e desvanecimento de curto prazo, conforme especificado na Tabela 3.1. A variável d é a distância em metros do EU a partir de um dado PT; θ é o azimute em graus.

O desvanecimento de curto prazo considerou EU em movimento uniforme à velocidade de 3 km/h e frequência portadora de 2,0 GHz. Para o sombreamento, considerou-se um desvio padrão de $\sigma_{sh} = 8$ dB.

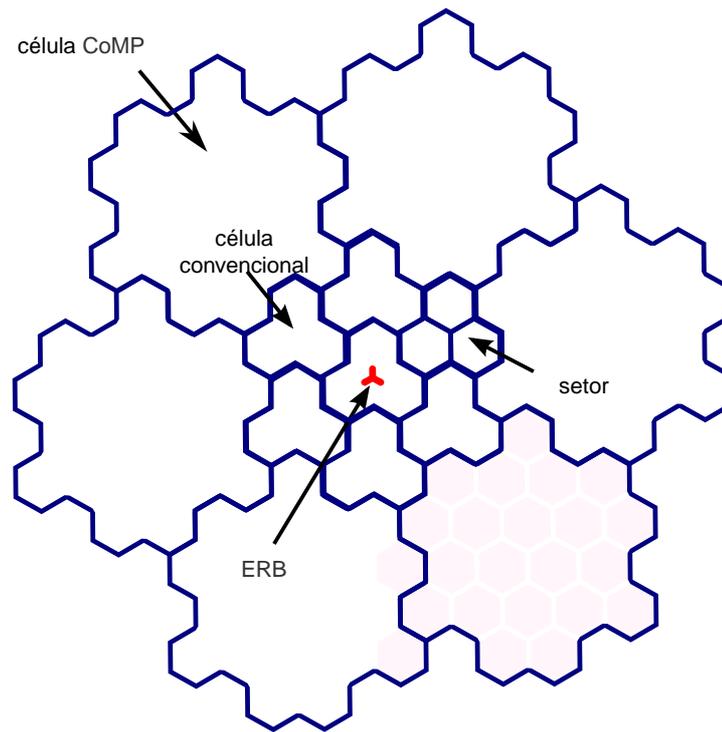


Figura 3.12: Sistema composto por sete células CoMP.

Tabela 3.1: Modelos adotados para as componentes do ganho do canal.

Componente	Modelo
perda de percursos média	$35,3 + 37,6 \log_{10}(d)$ [Parkvall et al. 2008]
sombreamento	variável aleatória log-normal
ganho da antena	$-\min\left\{12\left(\frac{\theta}{70}\right)^2; 20\right\} + 14$ [3GPP 2008]
perfil atraso-potência	urbano típico [3GPP 2008]
desvanecimento de curto prazo	modelo de Jakes [Jakes 1974]

No modelo considerado, a potência de transmissão é igualmente alocada entre as subportadoras. Cada subportadora transmite 14 símbolos por *transmission time interval* (TTI), cuja duração é de 1 ms. As subportadoras são agrupadas em blocos de 12 subportadoras ortogonais adjacentes e espaçadas de 15 kHz, representando um *physical resource block* (PRB) [Dahlman et al. 2011]. Utilizaram-se 25 PRBs contíguos.

A adaptação de enlace dispõe de quatro esquemas de modulação – *binary phase-shift keying* (BPSK), 4-, 16- e 64-*quadrature amplitude modulation* (QAM). Dependendo da qualidade do canal (viz. SINR), a adaptação de enlace escolhe a modulação que levará à máxima taxa de transmissão com restrição do valor de teto da *bit error rate* (BER). Devido a essa mesma restrição, a transmissão não ocorre para valores de SINR abaixo de 5,57 dB, pois levaria ao desperdício do recurso de rádio então alocado [Calvo 2004]. O *link budget* é calculado de tal modo que os EUs na borda de uma célula convencional

experimentem ao menos uma SNR de 5,57 dB.

Consideremos agora uma configuração estática de agrupamento que será tomada como referência para efeito de comparação com a abordagem proposta. Com três grupos, os $M = 21$ PTs disponíveis serão divididos em $K = 3$ subconjuntos disjuntos. A Figura 3.13 exemplifica a configuração desses três grupos, distinguindo-os através de diferentes cores, onde todos os PTs estão ativos.

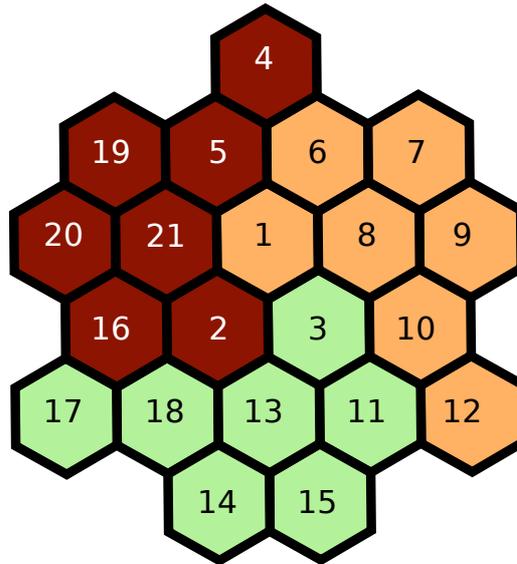


Figura 3.13: Configuração de três grupos estáticos tomada como referência.

3.5.2 Resultados de eficiência espectral

Os eventos de simulação são organizados em instantâneos (ou, do inglês, *snapshots*), durante os quais a perda de percurso e somreamento são supostamente constantes. Variações do canal de curto prazo, entretanto, são consideradas. Para tanto uma duração de pelo menos 1 s do instantâneo é requerida para compreender 10 períodos de coerência do canal. Diferentes simulações são realizadas para um mesmo conjunto de parâmetros, de modo a obter o intervalo de confiança a nível de 90% da principal métrica de desempenho avaliada: a eficiência espectral sistêmica.

Ao longo da seção, a eficiência espectral sistêmica é apresentada em função da carga oferecida, i.e. em termos do número de EUs fisicamente presentes em um setor, independente se eles foram ou não escalonados. Entretanto, os EUs não escalonados não contribuem para a eficiência espectral sistêmica. Desse modo, devido à diversidade multiusuário, quão maior a carga oferecida, maior será a eficiência espectral.

Inicialmente, avaliou-se o quanto o agrupamento afeta o desempenho do CoMP. As variações na força dos sinais desejado e interferente não são simples de serem previstas, entretanto o balanço entre os efeitos dessas duas parcelas pode ser capturado por meio da eficiência espectral sistêmica. A Figura 3.14 mostra a eficiência espectral sistêmica versus a carga oferecida, para algumas configurações de agrupamento: sem agrupamento (conv.), 2 ou 3 grupos e suas variantes designadas por 1/2, 1/3 e 2/3 grupos. A notação \check{K}/K grupos expressa a seleção parcial de grupos, significando que o conjunto com os 21 PTs disponíveis em uma célula CoMP é particionado em K grupos, mas somente $\check{K} \leq K$ grupos estarão ativos a um mesmo instante. Desse modo, note que 2 e 3 grupos poderiam ser alternativamente expressos como 2/2 e 3/3 grupos, respectivamente. Consideremos inicialmente que a escolha de \check{K} dentre os K grupos seja realizada de maneira aleatória.

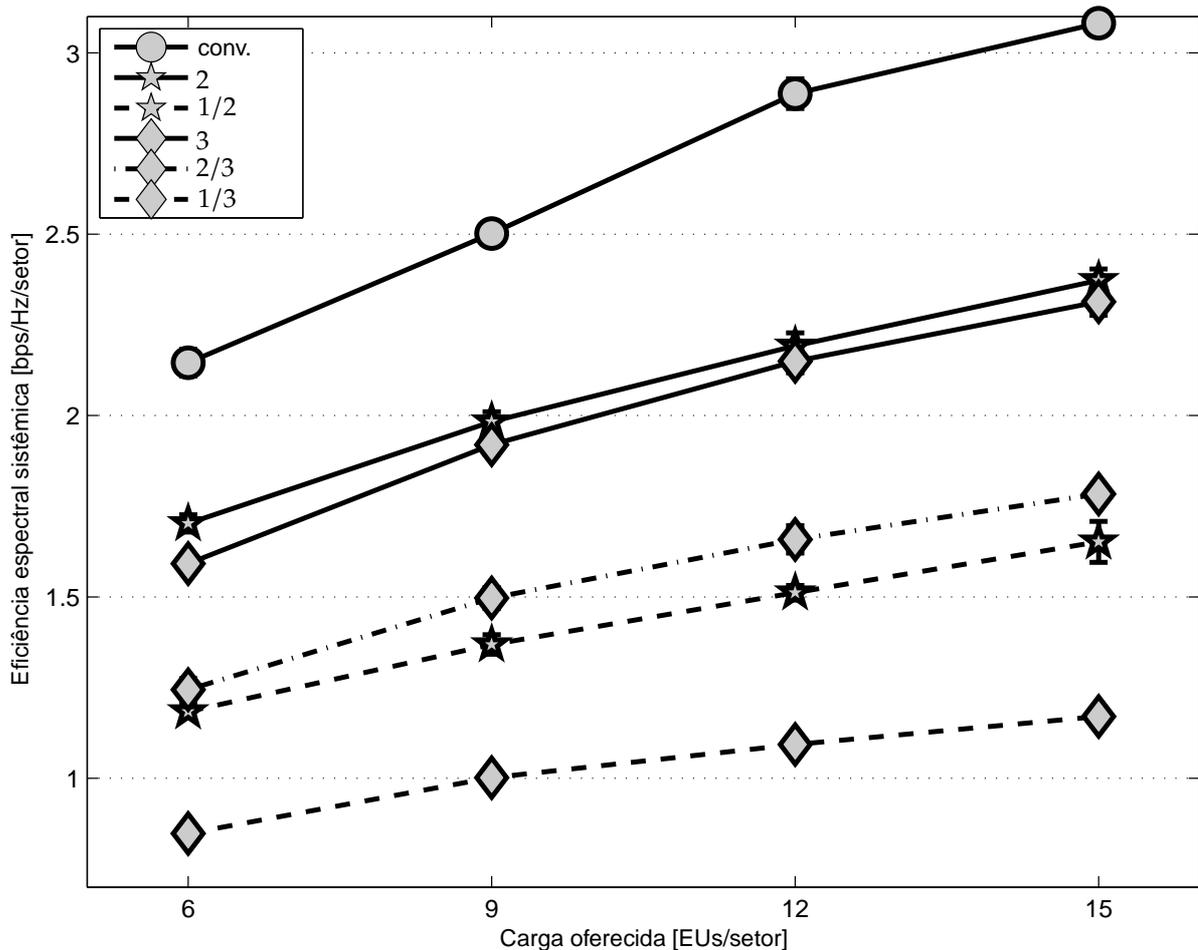


Figura 3.14: Eficiência espectral sistêmica para algumas configurações de agrupamento, com seleção plena ou parcial, sendo esta última realizada de maneira aleatória.

Por meio da Figura 3.14 percebe-se que a eficiência espectral sistêmica é reduzida à

medida que se aumenta K . Há uma redução na eficiência espectral sistêmica de cerca de 22,1%, na média, considerando todos os valores de carga, quando sai da configuração sem agrupamento para a com 2 grupos; a redução é de 24,9% ao sair da configuração sem agrupamento para a com 3 grupos. Saindo da configuração com 2 grupos para a com 3, observa-se um decréscimo médio na eficiência espectral sistêmica de cerca de 3,5%. Esse tipo de degradação é principalmente devido à geração de mais interferência intergrupos com a adição de grupos. De fato, o formatador de feixe ZF pode combater a interferência interna de cada grupo, mas não a interferência que vaza de um grupo para outro. Assim, o agrupamento acaba reforçando a interferência, sendo o principal preço do alívio da complexidade de coordenação.

A Tabela 3.2 reúne os valores médios da interferência total sofrida pelo sistema a uma carga oferecida fixa de seis EUs por setor. Quanto maior o número de grupos formados com seleção plena, maior a interferência total. Essa mesma interferência pode ser aliviada através do agrupamento com seleção parcial. À medida que os grupos são desativados, a potência interferente pode atingir níveis mais baixos que as configurações com seleção, mesmo com menos grupos. Contudo, o benefício da diminuição da interferência total não foi suficiente para compensar a perda de cobertura e de capacidade. Desse modo, a seleção parcial dos grupos implica a diminuição adicional da eficiência espectral sistêmica, como também pode ser notado na Figura 3.14: de 2 grupos para 1/2, a eficiência espectral sistêmica se reduz em cerca de 30,7%; de 3 grupos para 1/3, cerca de 48,3%; e de 3 grupos para 2/3, cerca de 22,5%.

Tabela 3.2: Interferência total média sofrida pelo sistema para uma carga oferecida fixa de EUs por setor, considerando algumas configurações de agrupamento, com seleção plena ou parcial, sendo esta última realizada de maneira aleatória.

Configuração de agrupamento	potência (dBmW)
sem agrupamento	-84,6
2	-79,2
1/2	-85,8
3	-77,2
2/3	-79,4
1/3	-87,6

Um outro aspecto a ser verificado é o ganho devido ao dinamismo do mecanismo de agrupamento possibilitado com o uso do algoritmo de assinalamento baseado em k -médias. A eficiência espectral sistêmica para a configuração estática da Figura 3.13 foi calculada e comparada à do agrupamento dinâmico, considerando seleções plena e parcial (aleatória) em uma configuração com três grupos. Esses resultados são

apresentados na Figura 3.15, com os marcadores quadriculados para o agrupamento estático e os triangulares vazios para o dinâmico. O ganho devido ao agrupamento é notório para todas as cargas e configurações de agrupamento avaliadas, indo de 11% a 20%.

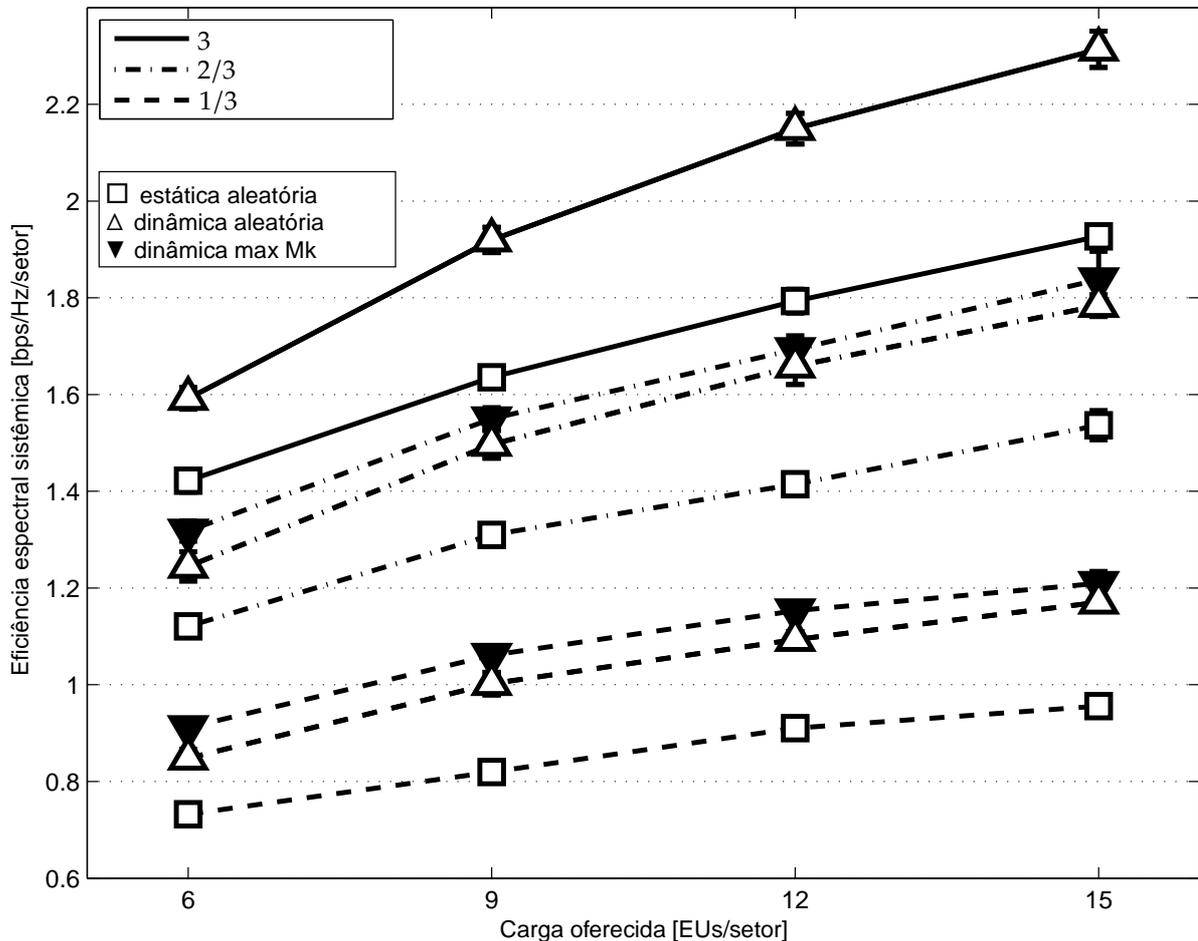


Figura 3.15: Eficiência espectral sistêmica de agrupamento realizado de maneira estática e dinâmica. Consideraram-se algumas configurações de agrupamento, partindo de 3 grupos com seleção plena ou parcial, sendo esta última realizada de maneira aleatória.

Ainda analisando os resultados representados na Figura 3.15, pode-se avaliar o impacto de outros critérios de seleção parcial dos grupos. As curvas com os marcadores triangulares preenchidos representa o desempenho para o critério *max Mk*, o qual prioriza a seleção daqueles grupos com maior número de PT disponíveis para coordenação. O ganho em termos de eficiência espectral sistêmica é observado para todas as cargas e configurações de agrupamento avaliadas. Na configuração 1/3, o ganho médio é de 5,6%; na configuração 2/3, o ganho é de 3,8%.

Apesar da perda em desempenho observada, o assinalamento por agrupamento

permite uma drástica redução na complexidade de coordenação. Uma vez que os grupos tenham sido definidos, qualquer informação de enlaces que cruzem os grupos – i.e. qualquer enlace entre um PT pertencente ao grupo k e um EU pertencente ao grupo k' onde $k \neq k'$ – pode ser ignorada. Assumindo, por exemplo, que os 21 PTs sejam igualmente particionados entre os três grupos da célula CoMP, portanto, cada um dos quais tem sete PTs exclusivos servindo sete EUs também exclusivos. No caso do agrupamento, deve-se estimar três matrizes com dimensões 7×7 cada, e depois operar suas inversões, enquanto que para o caso não agrupado a matriz é única, porém com dimensões 21×21 . Em outras palavras, com o agrupamento exemplificado, requer-se tão somente cerca de 33% das estimativas requeridas pelo não agrupado (desprezando-se ψ , por simplicidade); quanto à complexidade computacional, ela reduz-se para tão somente $1/9$.

No gráfico de barras empilhadas (horizontalmente) da Figura 3.16 apresenta-se o número de vezes que cada PT participou na composição de cada grupo. Todas as composições dos três grupos, considerando apenas a seleção plena, obtidas a cada TTI e PRB foram armazenadas em um único conjunto C . Não obstante, composições idênticas de grupo ocorridas em instantes adjacentes podem ser indexadas diferentemente. Podemos criar uma indexação auxiliar tal que composições muito semelhantes sejam identificadas como instâncias de um mesmo grupo. Para isso, cada formação é representada com um vetor $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^M$, e o algoritmo k-médias é empregado novamente, agora para agrupar formações similares em grupos referenciados como A, B e C. Aos elementos de \mathbf{d} são atribuídos 0s e 1s dependendo se o respectivo PT foi habilitado para cada observação: $\mathbf{d}(m) = 1$ se $m \in \bigcup_{k=1}^K \mathcal{M}_k$, caso contrário $\mathbf{d}(m) = 0$. Primeiramente, nota-se que todos os PTs foram usados, entretanto cada um deles foi alocado mais frequentemente para um certo grupo; cada grupo é predominantemente composto por um dado subconjunto de PTs. Ao menos em 60% das iterações, o grupo 1 foi composto pelos PTs cujos índices vão de 6 a 10; o grupo 2 composto pelos PTs 11, 13, 14, 15 e 18; e o grupo 3, pelos PTs 5, 16, 19, 20 e 21; os PTs remanescentes são os de índices 1 a 4, 12 e 17, que indistinta e eventualmente participaram de qualquer um dos grupos. Essas composições predominantes, ilustradas na Figura 3.17, dependem de uma combinação das condições instantâneas dos enlaces e dos posicionamentos de PTs e EUs.

Até aqui presumiu-se que cada EU seja apto a medir de maneira confiável e reportar o ganho do canal de todos os PTs associados a sua célula CoMP. Entretanto, devemos estar cientes das limitações práticas envolvidas nessa funcionalidade, sobretudo pela possibilidade de os sinais provenientes de PTs distantes serem estimados sem a

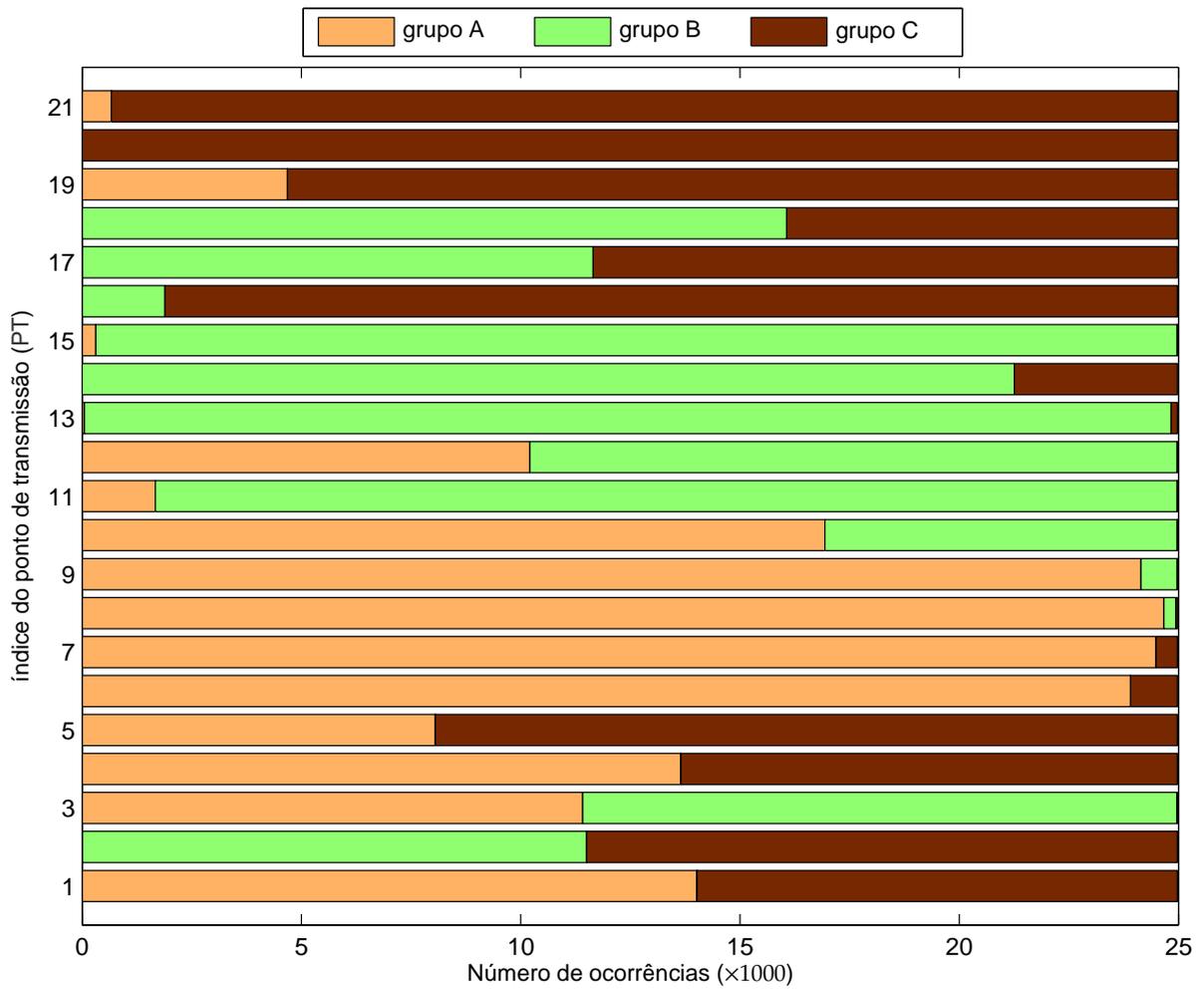


Figura 3.16: Ocorrências de cada PT em cada um dos 3 grupos (seleção plena).

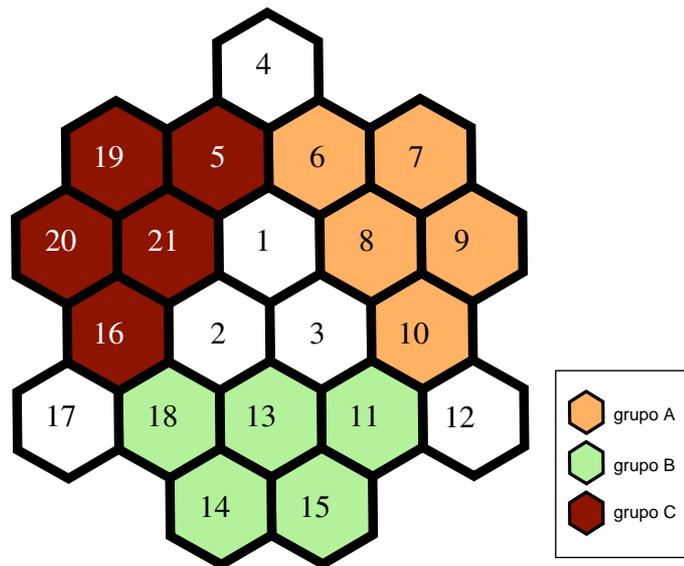


Figura 3.17: Relação das composições predominantes dos três grupos com os índices de PTs para 60% das observações; os setores em branco referem-se aos PT remanescentes.

energia necessária para assegurar a confiabilidade requerida. Nos resultados a seguir, considerou-se uma restrição para o número máximo de PTs cujas FSRs podem ser simultaneamente estimadas por cada EU, de modo que possamos nos referir a uma determinada configuração por limitação do conjunto ativo dos pontos de transmissão (LCA) de M_{lca} PTs. Para cada EU j em cada célula CoMP c , os M_{lca} PTs que apresentem os menores valores de $V_{j,m_c} \in \mathcal{M}$ definirão um subconjunto de exclusão \mathcal{M}_- . Para cada $m \in \mathcal{M}_-$, os valores de $V_{j,m,c}$ serão atualizados para um valor mais baixo que o menor valor que possa ser estimado, e.g. $1/10$ deste, e $h_{j,m,c} = 0$.

A Figura 3.18 mostra a eficiência espectral sistêmica versus a carga oferecida para algumas configurações de agrupamento – sem agrupamento (conv.), 2 ou 3 grupos – e de LCA – 21 (sem limitação), 15, 9 ou 6 PTs –. À medida que a LCA é reduzida, a eficiência espectral sistêmica degrada-se para todas as configurações de agrupamento avaliadas. Fixando-se a carga oferecida em 6 EUs por setor, porém considerando mais valores de LCA, o gráfico na Figura 3.19 revela uma relação entre eficiência espectral e LCA próxima à linearidade na faixa avaliada. Retornando à Figura 3.18, no caso sem limitação do número máximo de PTs que possam ser estimados, i.e. LCA de 21 PTs, o desempenho da configuração com 2 grupos representa uma perda média de 22% em relação à configuração sem agrupamento; enquanto que a configuração com 3 grupos apresenta uma perda de 25% ao se comparar ao desempenho sem agrupamento. Não obstante, para o caso de LCA em 15 PTs a perda em desempenho com 2 grupos reduz-se a 19%, e com 3 grupos reduz-se a 22%.

Portanto, diante de um cenário com limitação do conjunto ativo dos PTs, percebe-se que as configurações com e sem agrupamento são penalizadas em termos de eficiência espectral sistêmica, porém a diferença entre o desempenho de ambas é diminuída. Todavia, os benefícios das configurações com agrupamento em termos de redução de quantidade de sinalização e de processamento são plenamente preservados.

3.6 Considerações Finais

Este capítulo abordou o sistema *coordinated multipoint* (CoMP) com processamento conjunto – especificamente o pré-codificador *zero-forcing* (ZF) –, dando enfoque à complexidade de coordenação. Dividir o conjunto com todos os pontos de transmissão ativos em K grupos mutuamente exclusivos mostra-se como uma abordagem apropriada para aliviar esse tipo de complexidade; contudo, a perda de desempenho

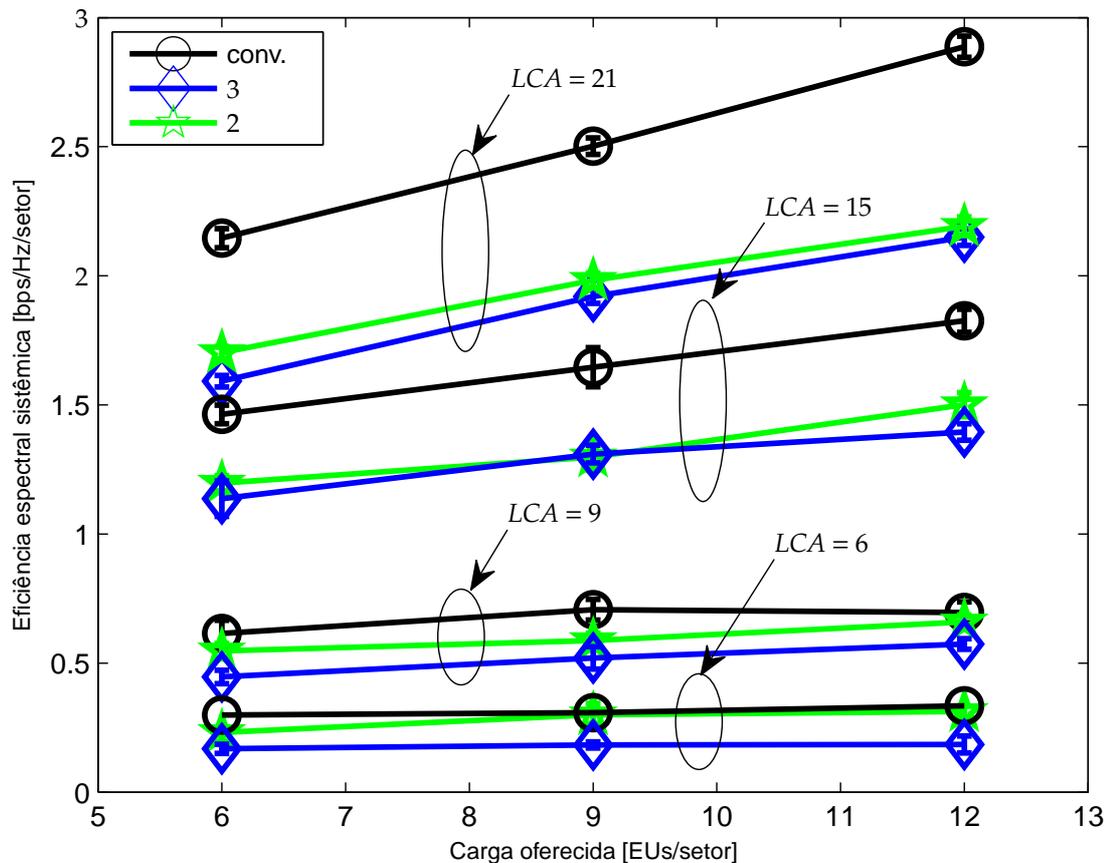


Figura 3.18: Eficiência espectral sistêmica para diferentes configurações de agrupamento e de LCA.

em termos de eficiência espectral é seu principal efeito colateral. As matrizes de canal desses grupos têm dimensões menores às do caso não agrupado, levando a uma significativa redução na quantidade de sinalização ($\propto 1/k$) e, principalmente, na complexidade computacional: $\propto 1/k^2$ para o pré-codificador e $\propto 1/k^3$ para o escalonador baseado em projeções sucessivas dos canais. Contudo, a tarefa de agrupamento, por si só, pode comprometer a complexidade computacional. Alternativamente, através da aprendizagem de máquina – com base especificamente no algoritmo k-médias –, possibilitou-se agrupar dinamicamente os equipamentos de usuários (EUs) com relação à similaridade de seus vetores de força; em seguida, com base nos vetores protótipos, realiza-se o agrupamento dos pontos de transmissão (PTs). Desse modo, pôde-se conquistar expressiva simplificação na tarefa de agrupamento. A forma de aplicação do algoritmo k-médias é inédita, tratando-se de uma das principais contribuições desta tese. A perda na eficiência espectral sistêmica foi estimada por meio de simulações

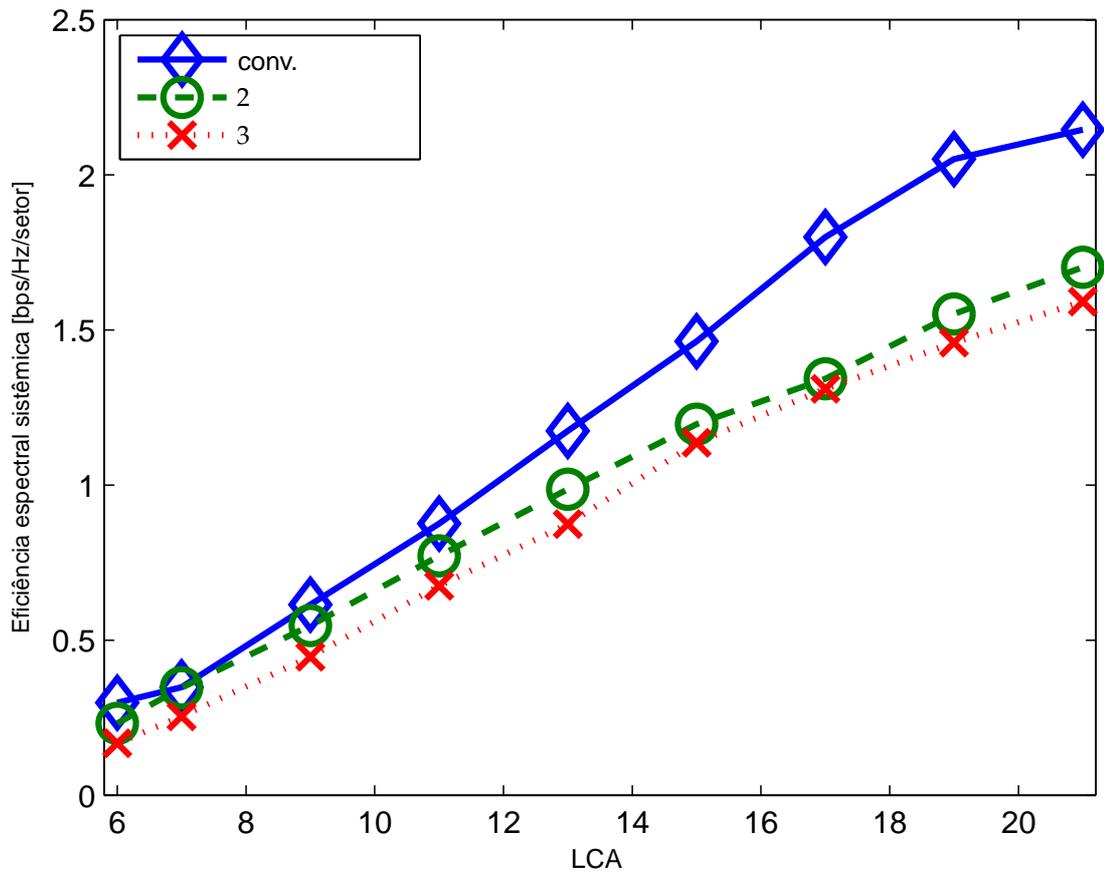


Figura 3.19: Eficiência espectral sistêmica versus LCA para diferentes configurações de agrupamento dada uma carga oferecida de 6 EUs por setor.

computacionais, dando subsídios à avaliação de até quanto reduzir a complexidade de coordenação mantém-se vantajoso.

4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO ENLACE DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEIS ATRAVÉS DE REDES NEURAIAS

AVALIAR o desempenho de um sistema de comunicação móvel é etapa crucial na investigação de novas tecnologias. Através do método apropriado de avaliação de desempenho procura-se mensurar a eficiência do sistema ou de parte dele para a transmissão de serviços de voz e/ou de pacotes de dados diante das mais diversas condições. Com isso, possibilita-se observar a harmonia entre os elementos constituintes do sistema bem como analisar seu comportamento como um todo. Por consequência, habilita-se o estudo dos aprimoramentos cabíveis.

Neste capítulo, direcionam-se os esforços à investigação de abordagens de avaliação de desempenho de enlace de sistemas de comunicação móveis. Interferência cocanal e ruído térmico tendem a afetar o desempenho de maneira diferente, especialmente para cenários com poucas fontes interferentes, tal como quando usuários na borda de célula são servidos por um sistema com espectro não espalhado. Ao longo deste texto, discute-se a inabilidade da abordagem clássica, denominada *exponential ESM* (EESM), em discernir o quanto as potências interferentes e de ruído térmico afetam o desempenho do enlace, tal como defendido em Stancanelli et al. (2011). Propõe-se uma abordagem inovadora para a modelagem de interfaces enlace-a-sistema L2S (do inglês, *link-to-system level*), a qual utiliza redes neurais artificiais (RNAs) devidamente treinadas para se comportarem como uma ferramenta de simulação do nível de enlace, permitindo assim a predição de maneira imediata por parte da ferramenta sistêmica, levando em conta ruído térmico e interferência separadamente.

Cobrando esse escopo, o restante do atual capítulo é dividido em seis seções, versando sobre distintos assuntos antes de combiná-los. Inicialmente, a seção 4.1

introduz os conceitos envolvidos na avaliação de desempenho de enlace com foco na interface enlace-a-sistema L2S. Na seção 4.2, proporciona-se um breve ensaio para caracterização de um cenário limitado por interferência típico, inspirado nos sistemas *3rd. Generation Partnership Project (3GPP) Long Term Evolution (LTE)*, como potencial condição adversa a interfaces L2S. A clássica interface L2S EESM é descrita na seção 4.3. Na seção 4.4 introduz-se a interface L2S baseada em RNAs, denominada *neural link-to-system interface (nL2Si)*, consistindo na proposta principal deste capítulo. Em seguida, na seção 4.5, apresentam-se diversos resultados computacionais confrontando a nL2Si à EESM, sobretudo diante de condições adversas. Por fim, o resumo do capítulo e as principais conclusões estão contidos na seção 4.6.

4.1 Avaliação de Desempenho

Há vários métodos disponíveis para avaliar o desempenho de sistemas de comunicações. O método de *experimentação direta* consiste em fazer uso do sistema real para conduzir as medições necessárias bem como calcular as métricas de interesse. Essas medições realizadas a partir de um sistema real tendem a ser bastante confiáveis, no entanto, são também muito dispendiosas, visto pressuporem a disponibilidade do sistema e do espectro – no caso de sistemas de comunicações sem fio – para a realização dos experimentos. Na tentativa de reduzir esses custos, pode-se alternativamente realizar os experimentos sobre uma réplica física do sistema real, usualmente em menor escala. Trata-se do método amplamente conhecido com *prototipagem*, cujo principal atrativo é o fato de poupar o sistema real. Em contrapartida, tolera-se uma menor confiabilidade dos resultados, por conta de imperfeições inerentes ao processo de modelagem do protótipo.

Noutro extremo, encontra-se o método baseado na *análise teórica*, cujos custos se restringem principalmente aos recursos humanos. Tomando como base, por exemplo, leis da física, teoria da informação, e modelos matemáticos em geral, pode-se proceder à predição de desempenho. Entretanto, a elevada complexidade dos sistemas atuais, que envolvem desde estratégias complexas de gerenciamento dos recursos de rádio (GRR) até decodificação turbo, faz com que sua análise holística seja bastante desafiadora. As incessantes interações entre os elementos constituintes do sistema bem como entre esses elementos e o ambiente ao redor, trazem implicações às leis e teorias consideradas que podem não ser conhecidas em sua completude. Somada a isso, a usual dependência dos processos envolvidos a variáveis como tempo, frequência e espaço, dificultam a

obtenção de expressões fechadas para governar os modelos teóricos.

Quando se chega a tal nível de dificuldade, o método baseado em *simulação computacional* pode ser o mais apropriado, o qual combina modelos¹ matemáticos e empíricos [Jeruchim et al. 2000]. A modelagem de fenômenos e sistemas complexos torna-se exequível com base no conhecimento do comportamento de seus elementos constituintes. Winsberg (2001) defende a simulação como um rico processo inferencial.

Assim como os métodos analíticos, a simulação computacional traz dois aspectos interessantes se comparados aos métodos de experimentações diretas e de prototipagem. O primeiro aspecto se refere à natureza dos custos, que passam a ser governados pelas atividades de programação e pela plataforma de *hardware* necessária à realização das simulações. O segundo aspecto refere-se à controlabilidade dos experimentos. Através de uma apropriada ferramenta de simulação, pesquisadores podem, de maneira metódica, isolar um ou vários parâmetros específicos, bem como capturar o estado geral do sistema à ocorrência de eventos específicos. Além do mais, a controlabilidade característica do método de simulação computacional possibilita a exata reprodução de experimentos.

O método de avaliação computacional é o único tratado aqui. Ainda assim, consiste em um assunto deveras vasto, que se aflora nas boas condutas de programação computacional [Zobrist & Leonard 1996, Stancanelli et al. 2009], sustenta-se na modelagem dos mecanismos [Jeruchim et al. 2000, Ikuno et al. 2010, Ikuno et al. 2012] e tem suas raízes afixadas na filosofia da ciência [Winsberg 2001, Accioly 2008]. Por não se tratar do ponto central desta tese, o método de simulação computacional será descrito tão somente de maneira suficiente para o contexto.

As simulações computacionais são bastante comuns nas investigações sobre comunicações móveis conduzidas mundialmente, sendo adotadas tanto na indústria quanto na academia. Dohler et al. (2011) esperanças as simulações computacionais como uma espécie de ponte de interligação entre esses dois afastados ramos de atuação.

De fato, torna-se mais simples e viável avaliar – e, por consequência, analisar, testar e aprimorar – modelos ao invés do sistema real. Aprimorar a confiabilidade dos modelos envolvidos é o modo mais imediato de aperfeiçoar também a confiabilidade dos resultados obtidos através das simulações computacionais.

¹Modelos, conforme envolvidos nos métodos de prototipagem, de análise teórica e de simulação computacional, são representações de partes ou aspectos selecionados do sistema, que têm assumido papel central nos mais diversos contextos científicos, protagonizando discussões ontológicas e semânticas [Frigg 2006].

Contudo, essas simulações podem ser um tanto quanto complexas em termos de esforço computacional. Os modelos envolvidos devem compreender os comportamentos individuais e mútuos dos equipamentos de usuários (EUs) e das estações rádio base (ERBs), bem como as interações de todos estes com o ambiente que os envolve. Essas interações ocorrem de maneira ampla, passando pelos muitos processos envolvidos em um experimento de comunicação: desde as interações eletromagnéticas até as decisões de escalonamento e de coordenação.

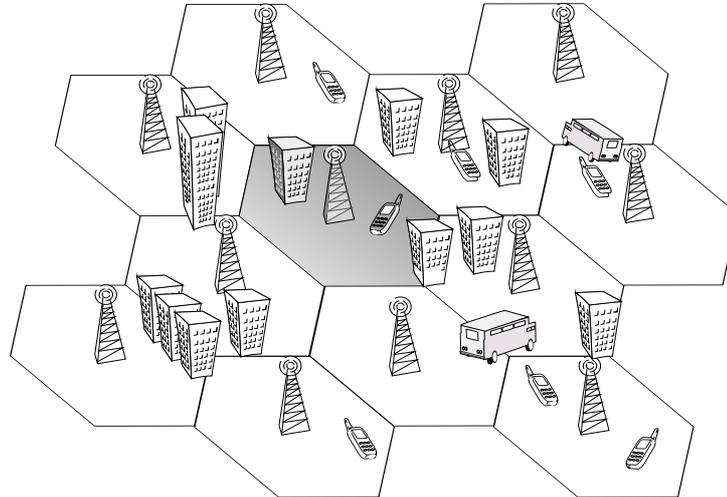
Comumente um grande número de funcionalidades está envolvido nos processos estabelecidos em uma rede de telefonia móvel celular, tais como configuração da grade celular, geração de tráfego, variação das condições de canal, decisões de gerenciamento dos recursos, execução da cadeia de transmissão etc. Esses módulos funcionais, em meio a muitos outros típicos das redes celulares, são elencados na Figura 4.1.

A adoção de um simulador único, completo, abrangendo todas as possíveis funcionalidades, das camadas inferiores às superiores, tem sido descartada pelos estudiosos. Justamente devido à riqueza de detalhes envolvidos na modelagem das redes celulares, muitos pesquisadores têm adotado a abordagem de separar as funcionalidades desejadas em duas ferramentas de simulação complementares: uma para simulações em nível de enlace, LL (do inglês, *link-level*) (vide, por exemplo, Stancanelli et al. (2009)), e outra para simulações em nível sistêmico, SL (do inglês, *system-level*) (vide Chen et al. (2011)). A ferramenta LL avalia operações concernentes ao enlace de rádio, tipicamente por meio de simulações da modulação, codificação de canal, propagação do canal rádio etc. A ferramenta SL conduz tipicamente o gerenciamento de recursos, incluindo admissão e/ou bloqueio de conexões, escalonamento, alocação de canais e outros recursos, geração de tráfego etc. Na Figura 4.2, destaca-se um certo enlace [Figura 4.2(b)] ante uma célula específica

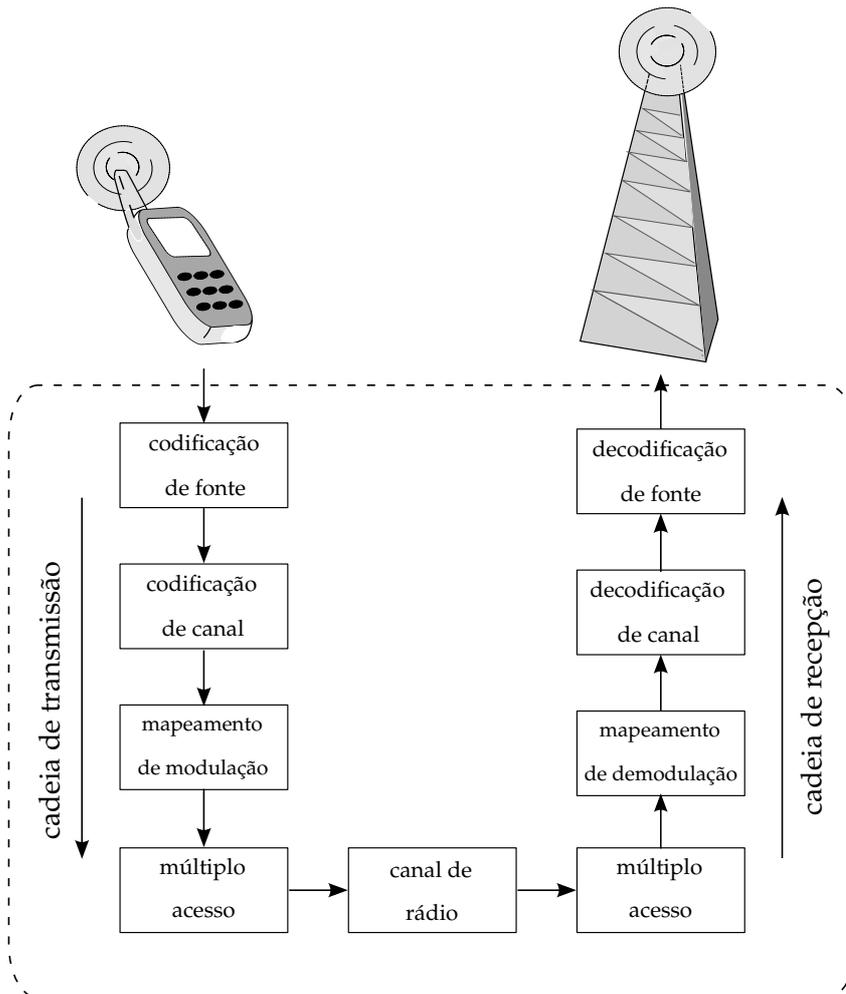
grade celular	alocação de potência	sombreamento	cobertura	padrão de mobilidade	equalização	codificação de canal
controle de migração	natalidade e mortalidade	perda de percurso	geração de tráfego	desvanecimento de curto prazo	multiplexação	modulação
controle de congestionamento	admissão de chamadas	adaptação de enlace	escalonamento de pacotes	ARQ híbrido	detecção	processamento de sinais

Figura 4.1: Algumas funcionalidades típicas envolvidas por uma ferramenta de simulação computacional de uma rede celular.

[Figura 4.2(a)]. Alternativamente, pode-se mediar os resultados de avaliação obtidos de uma variedade de enlaces de modo a definir uma métrica de qualidade válida para várias células e enlaces.



(a) foco em uma célula.



(b) foco em um enlace.

Figura 4.2: Destaque do papel da ferramenta LL no contexto do sistema.

A ferramenta SL fará consultas referentes às simulações de enlace, seja para prever o desempenho de uma dada transmissão, seja para governar o curso de ações no que tange à escolha do esquema de modulação e codificação MCS (do inglês, *modulation and coding scheme*) ou versão de retransmissão. Considerações a respeito da troca de informações entre as duas ferramentas, muito provavelmente, repercutirão no desempenho sistêmico. Essas questões são tratadas pela interface entre as ferramentas LL e SL, conhecida como interface enlace-a-sistema L2S (do inglês, *link-to-system level*), a qual deve conciliar exatidão dos resultados e viabilidade computacional.

Interfaces L2S consistem em uma preocupação recorrente para os pesquisadores das comunicações móveis que se utilizam de simuladores. Várias soluções têm sido exploradas, entretanto, em geral elas se baseiam em duas abordagens distintas: valor médio [Olofsson et al. 1997, Holma 2003] e mapeamento efetivo [Brueninghaus et al. 2005, Tuomaala & Wang 2005]. Todas elas têm como objetivo comum evitar a execução de simulações de nível de enlace a cada vez que as simulações sistêmicas requisitem. Ao invés disso, durante as simulações sistêmicas realizam-se meras consultas a tabelas que já contenham estatísticas a respeito da métrica de enlace de interesse. Essas tabelas de busca são preenchidas a partir de exaustivas campanhas de simulações em nível de enlace, não comprometendo a velocidade de execução das simulações sistêmicas. Tanto no preenchimento da tabela de busca como nas consultas a esta realizadas, ocorre uma espécie de sumarização de informação, como discutido na seção 4.1.2.

4.1.1 Organização dos Níveis de Simulação

Modelos concebidos para a simulação computacional de sistemas de comunicações móveis devem representar o comportamento dos EUs e suas interações com ERBs e ambiente. Desde as ações provenientes do GRR até as interações físicas, diversos aspectos e mecanismos devem ser propriamente capturados e interligados, tais como, por exemplo, algoritmos de escalonamento, adaptação de enlace, retransmissões e equalização. Uma variedade de processos estocásticos é comumente modelada, incluindo geração de tráfego, demanda por serviço, mobilidade dos usuários, variação do canal rádio, ruído térmico entre muitos outros.

A validação de métricas de desempenho abrangendo diversos setores e/ou células está a cargo da ferramenta SL, cujo esforço computacional pode ser drasticamente aliviado com o auxílio da interface L2S. Por detrás da interface L2S encontra-se a ferramenta LL que lida com uma escala de tempo menor, tal como período de *chip*, bit ou

símbolo, ao utilizar os recursos de rádio disponibilizados. Assim, a ferramenta LL fica encarregada de reproduzir as operações desencadeadas para transmissão e recepção — i.e. (des-)entrelaçamento, (de-)codificação de canal e de fonte, (de-)modulação etc. — bem como a degradação típica devida ao canal rádio.

A especialização da ferramenta LL como parte de outra hierarquicamente superior, a SL, alivia substancialmente os esforços computacionais, contanto que a interface entre ambas as ferramentas seja apropriada. O projeto de interface L2S é normalmente realizado com base nos objetivos das simulações sistêmicas, entretanto deve impreterivelmente considerar as possibilidades oferecidas pela ferramenta LL.

No tocante à modelagem dos blocos funcionais, existe certa liberdade para definir a fronteira entre LL e SL, e, por consequência, também para projetar a interface L2S. Algumas funcionalidades em especial podem ser inseridas em qualquer das ferramentas ou até mesmo em ambas. Exemplos típicos dessas funcionalidades são a adaptação de enlace, desvanecimento de curto prazo e mecanismo de retransmissão [Stancanelli et al. 2009]. A escolha de onde inserir cada um dos blocos funcionais desse tipo de funcionalidade dependerá de uma combinação de fatores, tais como exatidão desejada, complexidade computacional tolerada e grau de detalhamento requerido pelos demais blocos funcionais. Na Figura 4.3, ilustra-se o caso em que o mecanismo *automatic repeat request* (ARQ) híbrido² pode ser inserido tanto na ferramenta LL como na SL. Quando inserido o mecanismo ARQ híbrido apenas na ferramenta LL, lidar com as versões de retransmissão passa a ser simples, por outro lado, torna-se confuso identificar a versão de retransmissão nas tabelas de busca. Alternativamente, quando o mecanismo ARQ híbrido é inserido apenas na ferramenta SL, é esta quem invoca as retransmissões, cada uma das quais vista como uma simples transmissão pela ferramenta LL. Tratam-se cada uma de simples transmissões, portanto, não sendo permitido executar uma regra de combinação que trabalhe em nível de bits. Pode-se ainda replicar uma dada funcionalidade em ambas as ferramentas, como ilustrado na Figura 4.4 para um exemplo hipotético contemplando o mecanismo de desvanecimentos de curto prazo.

²ARQ é um mecanismo que aciona retransmissões com base em informações fornecidas pelo receptor sobre o corrompimento da mensagem transmitida (e.g., via *cyclic redundancy check* (CRC)). Sua versão híbrida baseia-se na combinação de múltiplas versões recebidas de uma mesma mensagem. O ARQ híbrido é tipicamente implementado como *chase combining* ou *incremental redundancy*. Enquanto no *chase combining* as versões de transmissão e retransmissão são idênticas e os blocos errôneos são combinados para conduzir uma detecção mais confiável, na implementação *incremental redundancy* geram-se distintas versões de redundância [Stancanelli et al. 2009, Dahlman et al. 2011].

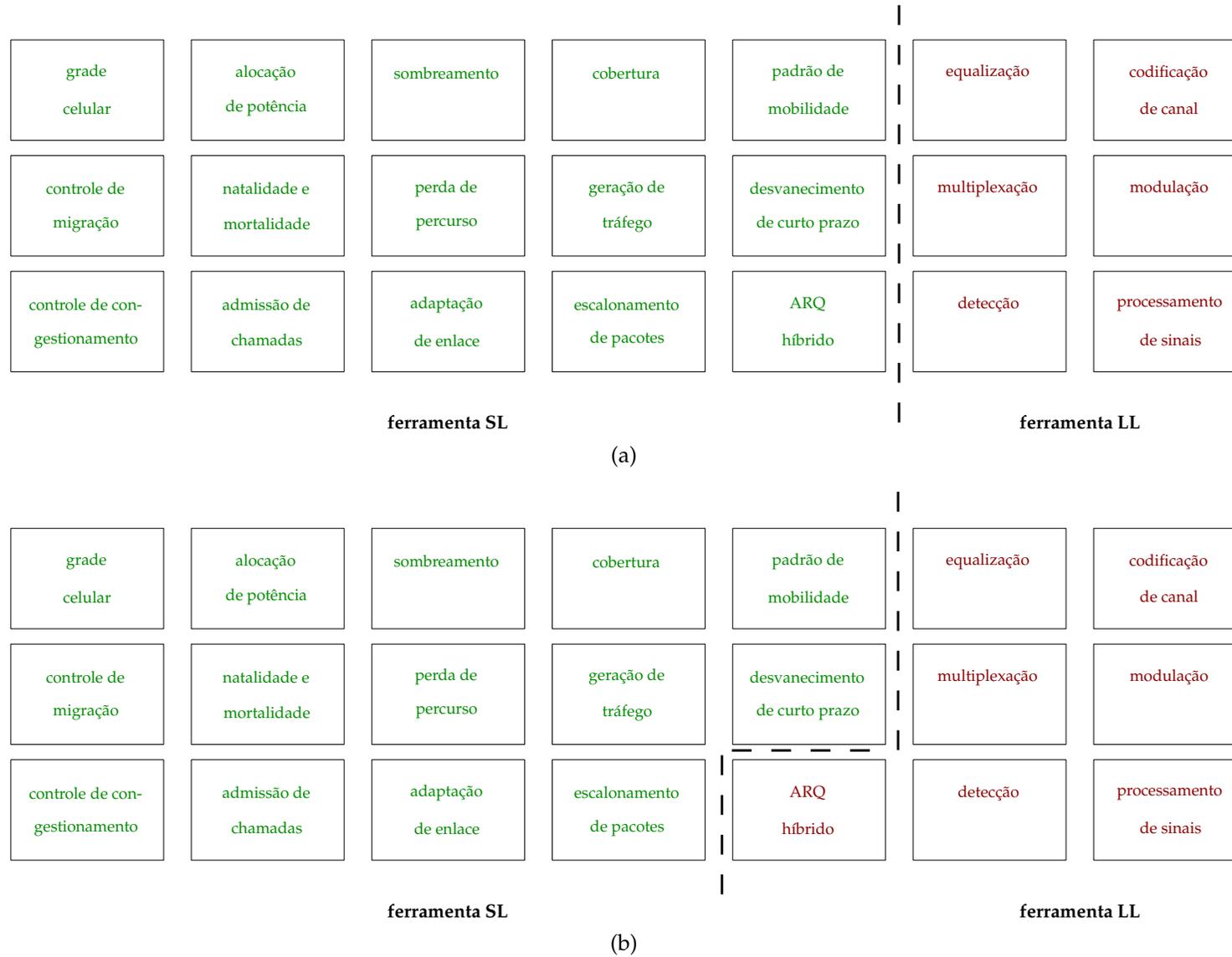


Figura 4.3: Exemplo do mecanismo ARQ híbrido sendo inserido na ferramenta (a) LL ou (b) SL.

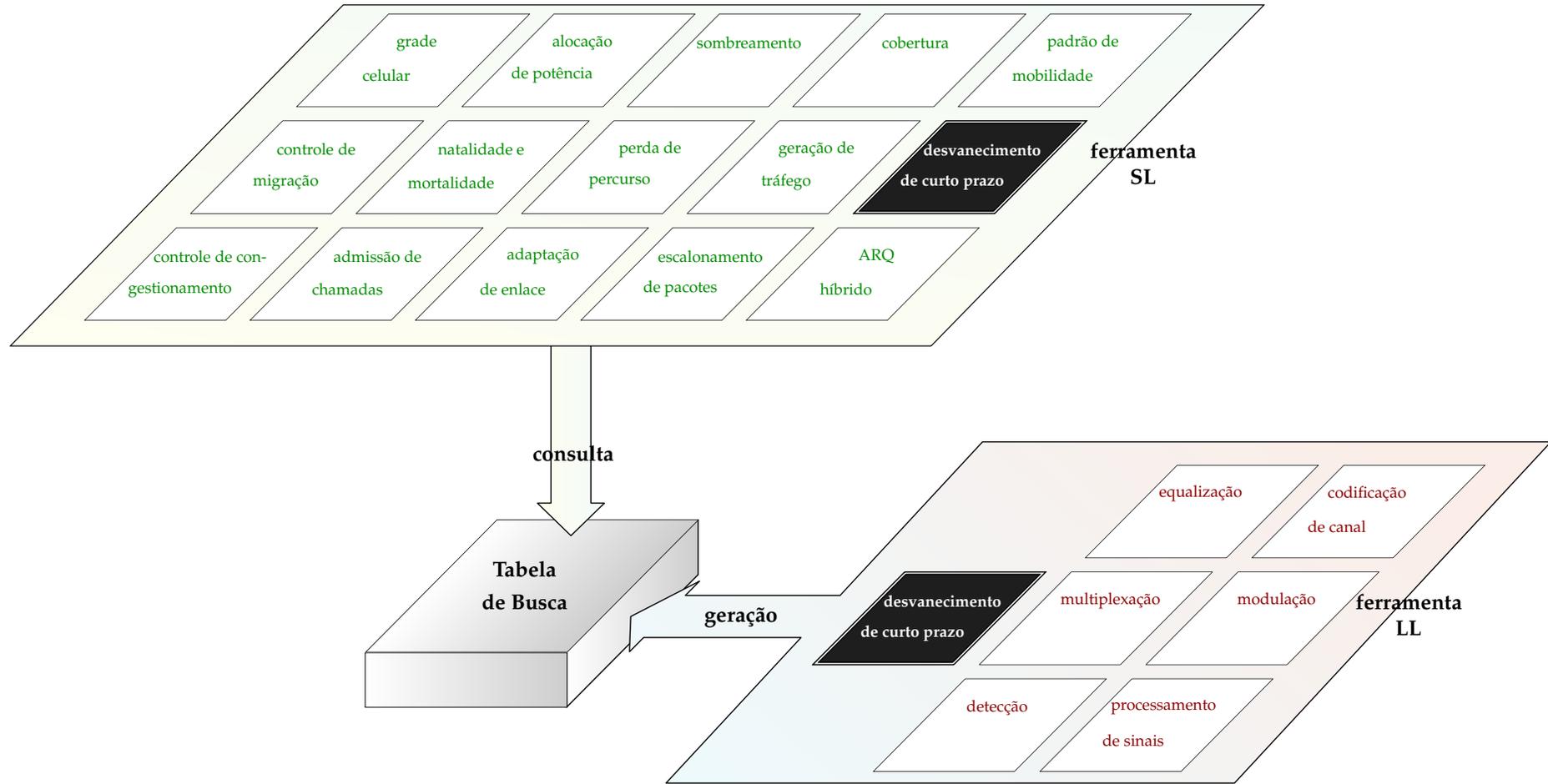


Figura 4.4: Exemplo com o módulo do desvanecimento de curto prazo sendo inserido na ferramenta LL e na SL.

4.1.2 Sumarização

Em um contexto amplo, a abordagem baseada em tabelas de busca é a solução mais difundida para identificação de sistemas não lineares com poucas entradas, tendo em seu histórico aplicações nos setores automotivo e industrial [Nelles 2000]. É também a abordagem dominante de interfaces L2S, sobretudo em virtude de sua simplicidade em lidar com modelos, sejam estes lineares ou não. Através de extensas campanhas de simulação em nível de enlace – usualmente conduzidas com base no método de Monte Carlo [Jeruchim et al. 2000] – estatísticas do desempenho do enlace e do estado do ambiente são armazenadas, gerando-se as tabelas de busca. As tabelas de busca são geradas antecipadamente em relação às simulações sistêmicas, sendo necessário gerar tantas tabelas quanto o número de cenários previstos a serem lidados pela ferramenta SL. Finalmente, através da interface L2S, a ferramenta SL consulta a tabela de busca apropriada para o corrente cenário em momentos específicos da simulação.

De modo a adotar uma notação mais abrangente, podemos nos referir a estado do ambiente ao invés de estado do canal. Por estado de ambiente refere-se a uma instância de valores de todas as variáveis necessárias em um dado contexto para ditar o desempenho da cadeia física e de enlace juntas, compreendendo as variáveis relacionadas ao canal do usuário em observação bem como à parcela interferente a ele imposta antes de qualquer processamento. A informação sumarizada a partir do estado do ambiente será denominada medida de qualidade do canal.

A principal vantagem da interface L2S baseada em tabelas de busca é que as simulações sistêmica e de enlace não têm de ser conduzidas simultaneamente. Por outro lado, sua principal desvantagem refere-se à confiabilidade das predições. Visto que normalmente aplica-se algum tipo de sumarização para obter a medida de qualidade do canal, há possibilidade de que estados de ambiente gerados na compilação das tabelas de busca não sejam os mesmos gerados durante as simulações sistêmicas.

As operações de sumarização podem ocorrer sem que os estados de ambiente – que aqui incluem todos os coeficientes complexos do canal e do sinal interferente combinado – sejam completamente preservados quando passados através da medida de qualidade do canal. Por exemplo, desde que as tecnologias *multiple input multiple output* (MIMO) e *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) tornaram-se realidade às redes celulares, o estado de ambiente tem adquirido uma alta dimensionalidade no espaço e na frequência, respectivamente. Entretanto, é usual sumarizar esse estado de ambiente em uma medida de qualidade de canal com dimensionalidade tão baixa

quanto a de um escalar.

As sumarizações podem se manifestar de diversas maneiras nas interfaces L2S, podendo acarretar em comprometimento da confiabilidade das predições em condições muito peculiares, doravante referidas como sendo *adversas*. Por *condições adversas* refere-se àquelas em que a interface L2S não seja capaz de discernir entre diferentes estados de ambiente. A existência de condições adversas indica uma limitação crítica no projeto da interface L2S. A distribuição não gaussiana da interferência bem como não linearidade inerentes às cadeias de transmissão e recepção, se não apropriadamente levadas em conta na especificação da interface L2S, poderão causar as tais condições adversas. Como exemplo, na proposta de uma interface baseada na *mutual-information* *ESM* (MIESM) para uma extensão MIMO do sistema 3GPP *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA), Wrulich & Rupp (2009) descreveram os termos de interferência envolvidos, entretanto sua modelagem não discerne entre as proporções das potências de ruído térmico e interferentes.

Propomos uma classificação das operações de sumarização em três tipos básicos:

- (i) sumarização entre estados de ambiente, perdendo a informação sobre a resposta individual das camadas física e de enlace a cada um desses estados, como, por exemplo, a média operada nas abordagens de interface do valor médio [Olofsson et al. 1997, Holma 2003];
- (ii) sumarização entre os elementos de um estado de ambiente ao extrair medida de qualidade de canal com dimensionalidade inferior, tal como na abordagem de interface da *signal-to-interference plus noise ratio* (SINR) efetiva [Brueninghaus et al. 2005];
- (iii) mistura de diferentes grandezas de interesse nas variáveis constituintes do estado do ambiente, tal como quando a relação SINR é adotada por abordagens de interface L2S, omitindo assim as proporções de potências devidas ao ruído térmico e à interferência.

Os primeiro e segundo tipos são provenientes de características inerentes e específicas de abordagens de interface L2S, ao passo que o terceiro tipo provém de práticas largamente adotadas em prol da simplicidade em diversas abordagens de interface.

Em alguns casos especiais a sumarização de terceiro tipo é aceitável. Múltiplo acesso

por espalhamento espectral contempla um desses casos [Pickholtz et al. 1982, SIMON et al. 1994], para o qual a função densidade de probabilidade da interferência pode ser aproximada como sendo gaussiana, similarmente ao que usualmente se adota para o modelo do ruído térmico. Não obstante, requer-se que o número de fontes interferentes afetando um dado EU a um mesmo instante e frequência seja grande o bastante para aplicar o teorema central do limite [Papoulis & Pillai 2002, Yao 1977]³. Fora desses casos especiais, a adoção da métrica SINR não será apropriada para preservar a informação completa dos estados de ambiente.

Até onde sabemos, não há abordagem de interface L2S adequada para lidar com ruído térmico e interferência regidos por diferentes distribuições de probabilidade. Ao longo das próximas seções, discutem-se as condições adversas principalmente relacionadas ao terceiro tipo de sumarização, bem como a proposta de lidar com esse tipo de situação.

4.2 Alguns Aspectos de um Cenário Interferente

Ruído térmico e interferência cocanal são os dois fatores mais comuns de degradação do desempenho dos vários tipos de sistemas de comunicações móveis, tendo origens muito distintas. Enquanto o ruído térmico é oriundo da movimentação desordenada dos portadores de carga elétrica no circuito de recepção [Motchenbacher & Connelly 1993], a interferência percebida por um dispositivo é proveniente de outras transmissões ocupando os mesmos recursos de rádio. Suas distribuições de probabilidade também são diferentes. Enquanto o ruído térmico é suposto ser uniformemente espalhado sobre a largura de banda de comunicação e apresentar função densidade de probabilidade gaussiana, a distribuição da interferência depende dos enlaces de rádio e parâmetros de transmissão de todas as fontes interferentes. Tais diferenças tendem a influenciar o desempenho do enlace em maior ou menor grau dependendo das muitas peculiaridades do sistema bem como do ambiente que o rodeia.

Considere o enlace direto de um sistema baseado em OFDM com especificações similares às do 3GPP LTE⁴. Suponha que o reuso dos subportadoras seja pleno, i.e. o espectro disponível é inteiramente explorado por todos os setores. Suponha ainda

³O teorema central do limite afirma que, sob certas condições gerais, a distribuição da soma de N variáveis aleatórias aproxima-se da normal [Papoulis & Pillai 2002].

⁴Especificações do LTE estão disponíveis através do endereço eletrônico <http://www.3gpp.org>.

não haver qualquer outro sistema usando os mesmos recursos de rádio. Várias ERBs estão presentes no sistema, as quais podem ser classificadas como estações rádio base servidoras (sERBs) – aquelas ERBs pressupostas a transmitirem a um dado EU – e estações rádio base interferentes (iERBs) – as demais ERBs ativas.

Considere um grupo com 19 células tri-setorizadas uniformemente distribuídas, como ilustrado na Figura 4.5. Sem perda de generalidade, admitamos que a ERB 4 exerça o papel de sERB; as ERBs enumeradas de 1 a 3 e de 5 a 7 constituem o primeiro anel interferente e as ERBs enumeradas de 8 a 19 constituem o segundo anel interferente.

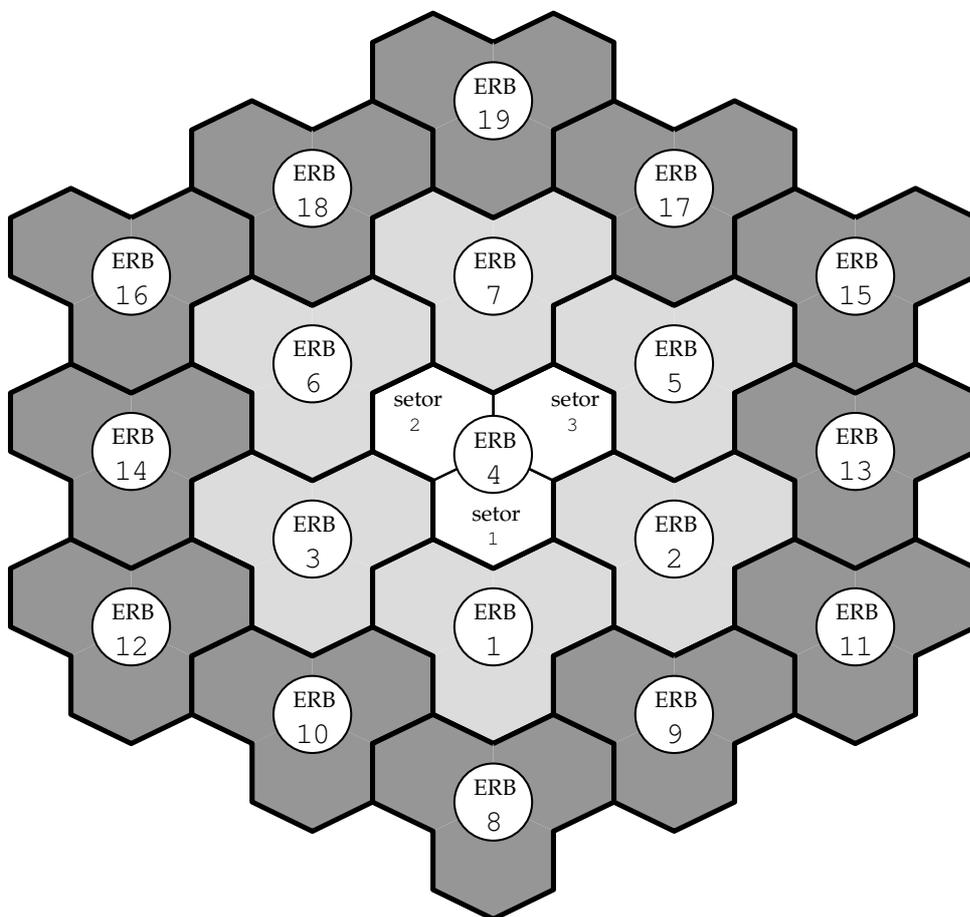


Figura 4.5: Grupo de 19 células tri-setorizadas, com a ERB 4 sendo a sERB. As demais ERBs exercem os papéis de primeiro e segundo anéis interferentes.

Consideremos que as antenas dos EUs sejam omnidirecionais, ao passo que as antenas das ERBs são direcionais em setores de 120° . De modo a abranger diferentes modelos comumente empregados para o padrão de radiação da antena, serão independentemente contemplados o modelo puramente horizontal e o modelo

vertical-horizontal. O primeiro modelo considera tão somente o plano horizontal, onde o ganho em dB pode ser expresso por [3GPP 2008]

$$G^{(a)}(\theta) = -\min\left\{12\left(\frac{\theta}{70}\right)^2, 20\right\} + 14; \quad (4.1)$$

o segundo considera o ganho nos planos horizontal e vertical e que pode ser expresso, em conformidade com Gunnarsson et al. (2008), em dB, por

$$\begin{aligned} G_{horizontal}^{(a)}(\theta) &= -\min\left(12\left(\frac{\theta}{65}\right)^2, 30\right) + 18, \\ G_{vertical}^{(a)}(\phi) &= \max\left(-12\left(\frac{\phi - \phi_{tilt}}{6,2}\right)^2, -18\right), \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde θ é o azimute; ϕ o ângulo negativo de elevação e ϕ_{tilt} o ângulo de rebatimento elétrico da antena, todos em graus.

Todas as ERBs estão transmitindo com mesma potência, bem como estão sujeitas a similar relação de perda de percurso, $G_{j,m}^{(pl)}(d)$, em dB, para um EU j distante d metros da ERB m , de acordo com o caso 1 de simulação descrito em 3GPP (2006),

$$G_{j,m}^{(pl)}(d) = 35,3 + 37,6 \log_{10}(d). \quad (4.3)$$

Os setores de cada célula são numerados de um a três, a partir do inferior e em sentido horário, tal como ilustrado na Figura 4.5 para a sERB.

Consideremos um usuário com seu EU movendo-se em linha reta ao longo do primeiro setor da sERB, como representado na Figura 4.6. O usuário parte de um ponto muito próximo à sERB, em uma região doravante denominada *centro de célula*, e chega ao ponto mais extremo do referido setor, em uma região doravante denominada *borda de célula*. A região de centro de célula é definida como sendo compreendida por um hexágono orientado conforme o setor, e com um quarto do diâmetro deste, posicionado o mais próximo possível⁵ da sERB. Posiciona-se ainda outro hexágono também orientado conforme o setor rente à sERB, porém com três quartos do diâmetro do setor; a região compreendida dentro do setor e fora deste hexágono é definida como a região de borda de célula.

Durante todo o deslocamento do usuário, armazenaram-se os valores de *força do sinal recebido* (FSR) contemplando todas as ERBs participantes. Os níveis da FSR

⁵De modo a contornar questões relacionadas a modelagem de campo próximo e assegurar valores finitos para (4.3), uma distância de guarda de alguns metros é considerada.

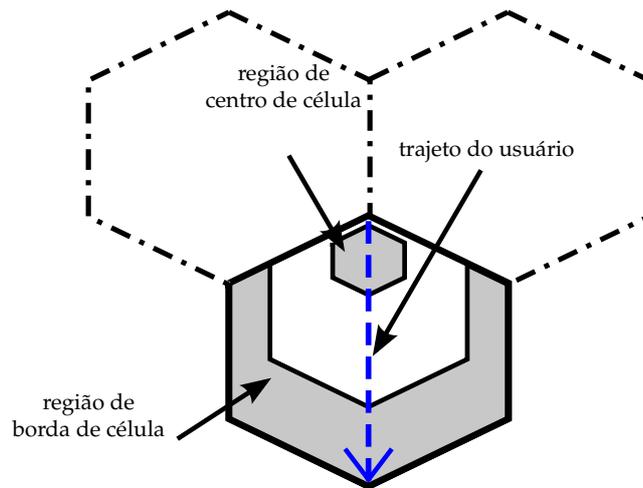


Figura 4.6: Usuário atravessando em linha reta o primeiro setor da sERB; a seta tracejada indica o sentido do movimento.

são apresentados na Figura 4.7 para os iERBs mais influentes, normalizados a cada posição do EU pela FSR principal – i.e. , a força do sinal proveniente do primeiro setor de sERB –, considerando um setor com diâmetro externo de 333 m e cada antena posicionada a uma altura de 32 m na ERB com ângulo de rebatimento elétrico de oito graus [Gunnarsson et al. 2008]. Ambos os modelos de padrão de radiação de antena das ERBs expressos em (4.1) e (4.2) são separadamente avaliados. Enquanto que para o modelo puramente horizontal a perda de percurso em função da distância entre transmissor e receptor determina um comportamento monotônico das curvas de FSR normalizada, o mesmo não se pode afirmar para o modelo vertical-horizontal de padrão de radiação de antena. Visto que o lóbulo principal é direcionado a algum ponto no deslocamento do usuário, a perda de percurso pode ser superada durante um certo trecho em torno desse ponto, ou especialmente imediatamente anterior a ele. Esse efeito é evidenciado através da inflexão observada nas curvas de FSR normalizada seguida da momentânea recuperação da FSR principal.

Ainda assim pode-se chegar a conclusões similares para ambos os modelos de padrão de radiação em termos da influência de cada fonte interferente. Enquanto o usuário se encontra na região de centro de célula, há um grande número de fontes interferentes, porém nenhuma delas tem potência expressiva com relação à do sinal principal. Consideremos que fonte interferente expressiva seja aquela cuja FSR normalizada seja maior que -10 dB. À medida que o usuário afasta-se da região de centro de célula, as FSRs interferentes aumentam, até que quando o usuário chega à região de borda de célula, uma ou no máximo duas fontes interferentes tornam-se

de fato expressivas. Fica então constatado que há casos em que o número de fontes interferentes é muito pequeno, não permitindo as comuns extrapolações feitas com base no teorema central do limite.

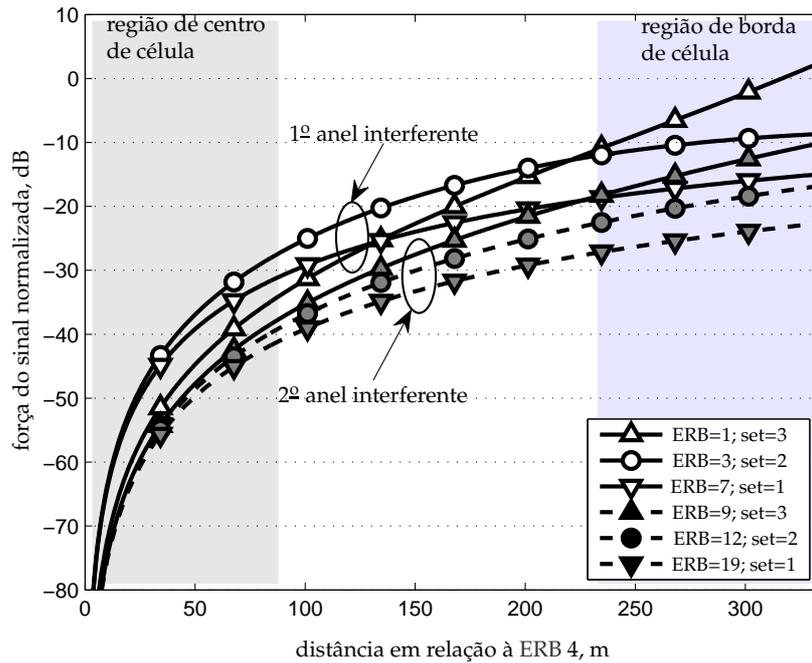
Para quantificar o impacto da interferência no desempenho do enlace é preciso levar em conta as modulações de fato usadas por cada uma das ERBs envolvidas, não apenas a sERB. Para tanto, consideremos por um momento um cenário hipotético onde não haja ruído térmico. Por simplicidade de análise, mas sem perda de generalidade, desconsideremos qualquer tipo de variação do canal – seja de curto ou longo prazo – até o final desta seção.

Inicialmente, consideremos a existência de uma única iERB. As probabilidades de erro de símbolos, SEP (do inglês, *symbol error probability*), e de bits brutos, RBEP (do inglês, *raw bit error probability*), podem ser obtidas através da superposição da constelação adotada pela sERB sobre a da iERB e, então, analisar os níveis relevantes da potência do sinal. Consideremos agora o caso em que a sERB esteja usando modulação QPSK (do inglês, *quadrature phase-shift keying*) enquanto a única iERB esteja empregando 16-QAM (do inglês, *quadrature amplitude modulation*). A Figura 4.8 ilustra o cenário do ponto de vista do plano de decisão definido pelo receptor do EU, em que a constelação transmitida a partir da sERB é posicionada sobre a da iERB. Desse modo visualiza-se diretamente a influência do sinal interferente sobre a detecção realizada no EU.

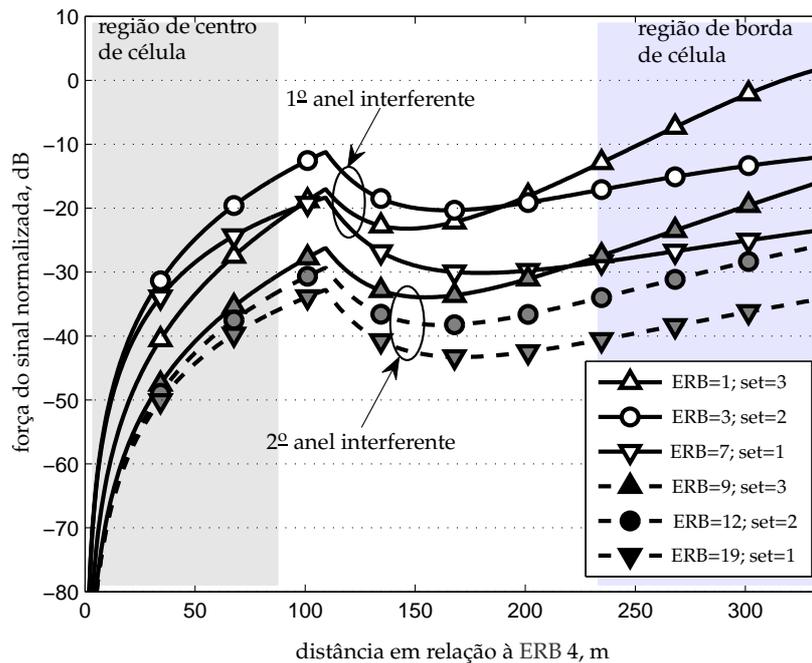
Na Figura 4.8(a), representa-se o caso drástico em que o sinal interferente predomina sobre o sinal de interesse e, portanto, determina qual o símbolo detectado pelo EU. Em outras palavras, no caso drástico representado, o símbolo detectado está descorrelacionado do símbolo transmitido pela sERB. Em contraste, na Figura 4.8(b) tem-se o caso desejado em que a potência do sinal interferente não é dominante, tal que todos os símbolos transmitidos pela sERB são corretamente detectados.

Portanto, dependendo da corrente razão interferência-sinal, ISR (do inglês, *interference-to-signal ratio*), dada por $ISR = SIR^{-1} = P_i/P_s$, um aumento infinitesimal na potência do sinal pode proporcionar o abandono do caso drástico direto para o caso ideal, onde P_i e P_s se referem respectivamente às potências recebidas interferente e de sinal desejado. Assim, RBEP e SEP podem ser abruptamente reduzidas. Para simplicidade de análise, a rotação de fase é desconsiderada aqui.

Sejam $P_i^{(0)}$, $P_i^{(1)}$ e $P_i^{(2)}$ os níveis quantizados de interferência, cujas raízes quadradas estão ilustradas na Figura 4.9 como raios dos três círculos definindo os níveis da modulação 16-QAM. Para a combinação exemplificada com as constelações QPSK e



(a)



(b)

Figura 4.7: Amostras das FSRs provenientes das iERBs capturadas ao longo do deslocamento de um usuário, normalizadas pela FSR proveniente do primeiro setor de sERB, para os padrões de radiação de antena transmissora (a) puramente horizontal e (b) vertical-horizontal.

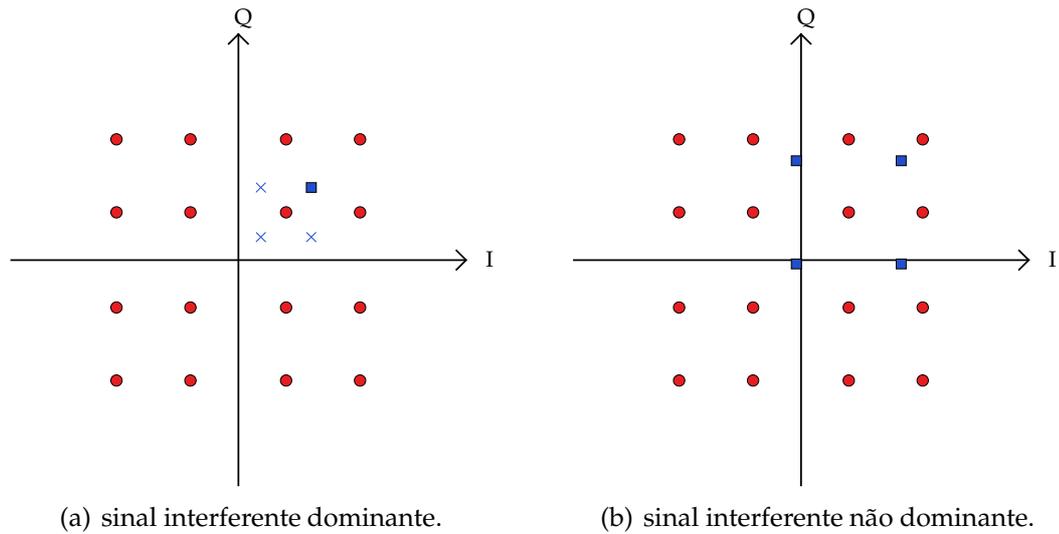


Figura 4.8: Cenário com um único iERB transmitindo através de modulação 16-QAM, enquanto a sERB emprega QPSK. O quadrado representa detecção correta, enquanto o símbolo \times representa a detecção errônea.

16-QAM, têm-se alguns possíveis casos nos quais o sinal interferente afetará a detecção do EU. Computando-se todos eles é possível determinar com exatidão a RBEP de um canal puramente interferente e não desvanecido,

$$RBEP = \begin{cases} 1/2, & \text{se } P_s < P_i^{(0)}; \\ 1/4, & \text{se } P_i^{(0)} < P_s < P_i^{(1)}; \\ 1/4, & \text{se } P_i^{(1)} < P_s < P_i^{(2)}; \\ 0, & \text{se } P_s > P_i^{(2)}, \end{cases} \quad (4.4)$$

bem como a SEP:

$$SEP = \begin{cases} 3/4, & \text{se } P_s < P_i^{(0)}; \\ 7/16, & \text{se } P_i^{(0)} < P_s < P_i^{(1)}; \\ 7/16, & \text{se } P_i^{(1)} < P_s < P_i^{(2)}; \\ 0, & \text{se } P_s > P_i^{(2)}. \end{cases} \quad (4.5)$$

Passemos agora à generalização para um grande número de iERBs. Visto que, usualmente, os receptores associados à tecnologia OFDM não discernem os sinais provenientes das diversas fontes interferentes, é apropriado tratá-los como constituintes de uma parcela interferente única, doravante denominada sinal interferente combinado (SIC). A plethora de combinações dos símbolos provenientes de diversas fontes cria uma nova constelação maior que as individuais. As constelações interferentes com diferentes números de níveis (bem como diferentes números de

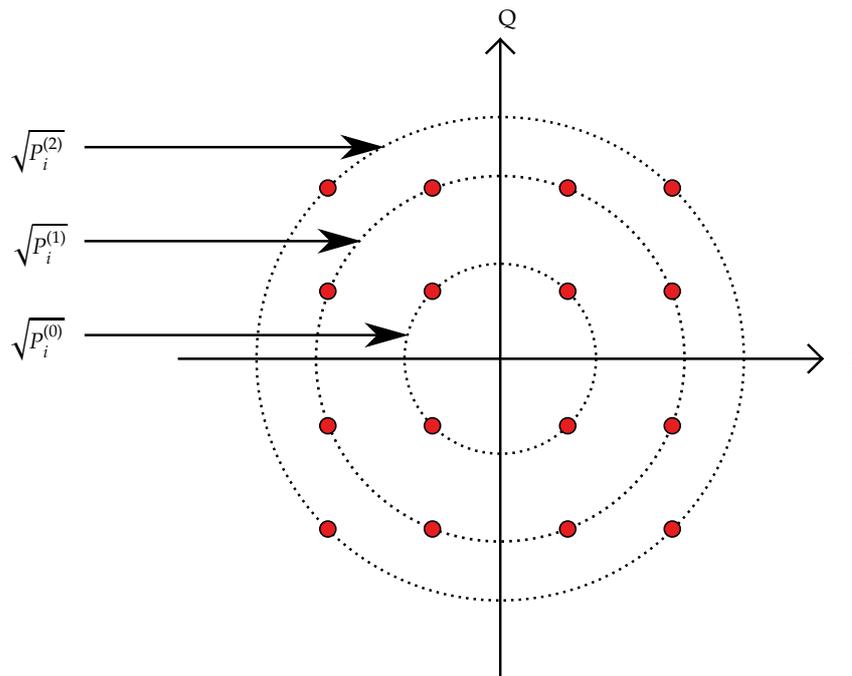


Figura 4.9: 16-QAM retangular e os três círculos relacionados aos níveis quantizados de interferência.

símbolos pertencentes a cada nível) tendem a afetar a detecção do EU de modo diferente. Procedimento similar pode ser seguido para calcular numericamente a RBEP e SEP para diferentes combinações das modulações de sERB e iERB. Na Figura 4.10, pode-se observar a curva RBEP para uma sERB transmitindo através de QPSK, considerando um cenário puramente interferente, para diferentes números de iERBs bem como diferentes modulações por elas empregadas. O gráfico da Figura 4.10 foi obtido considerando adoção de modulação e alocação de energia uniformes para as diversas iERBs. Para cada nível interferente cruzado pelo nível do sinal, tanto a SEP como a RBEP serão reduzidas, mantendo esses valores até que o nível do sinal cruze o próximo nível interferente. Os níveis de potência interferentes são dados pela constelação do SIC, que pode ainda considerar alguns níveis não representativos de interferência para esse ponto de vista, especialmente aqueles cujos símbolos apresentam posicionamentos irregulares, e.g. os pontos da constelação QAM retangular cujos ângulos não sejam $\pi/4$.

Constata-se primeiramente que a curva RBEP versus ISR é monotonicamente não decrescente. Diferente das curvas de formato suaves dos cenários limitados a ruído, as de cenário puramente interferente mudam seus valores apenas em alguns níveis de potência interferente resultando em um formato de degraus – i.e., RBEP muda apenas em valores específicos de *ISR*. Quão maior o número de iERBs, maior o número de

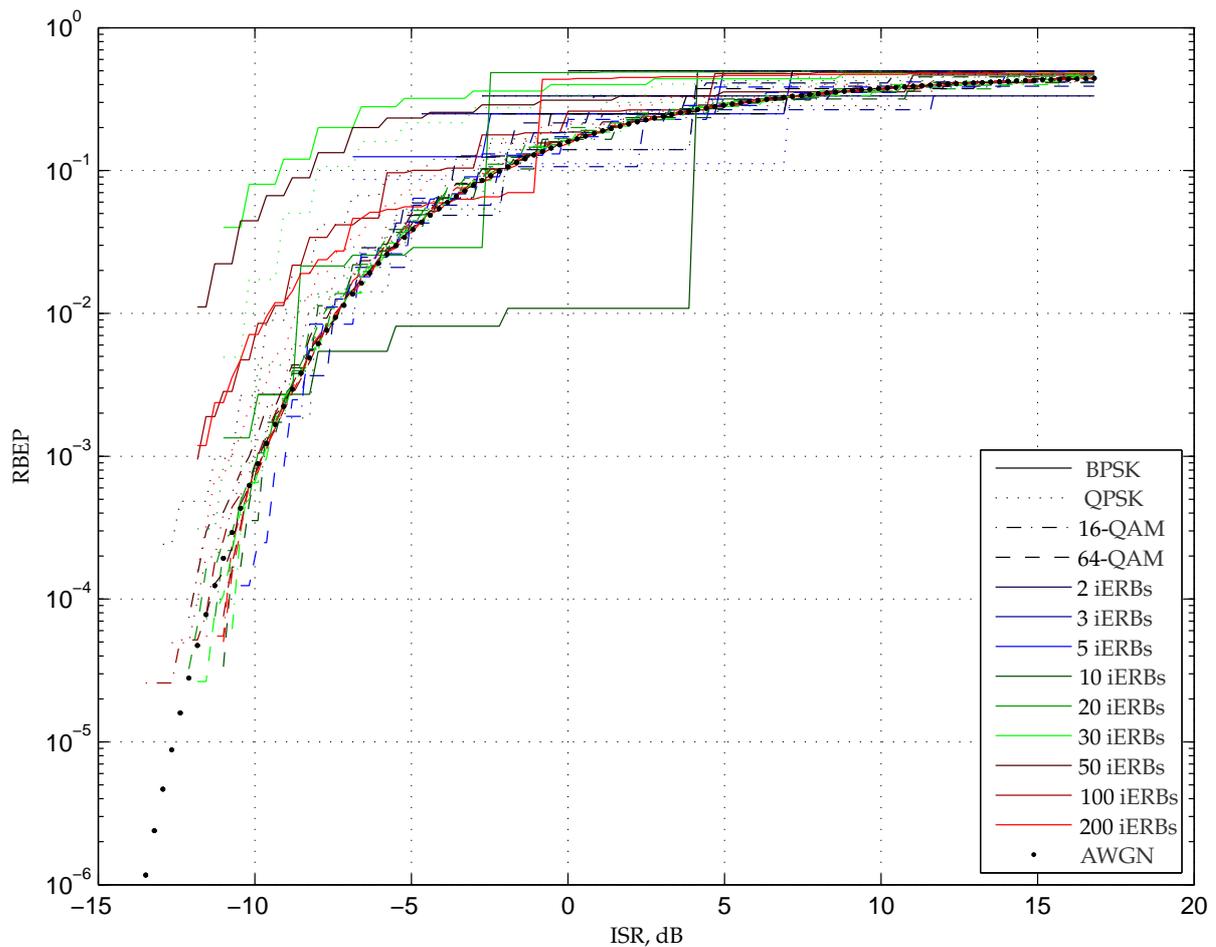


Figura 4.10: RBEP para transmissão através da modulação QPSK em cenários puramente interferentes com diferentes números de iERBs usando a mesma modulação com mesma potência. Para simplicidade de análise, o canal de rádio é desprezado.

níveis da constelação do SIC. À medida que o número de degraus aumenta, a média de seus tamanhos diminui e assim um maior número de interferentes irá suavizar o formato da curva de RBEP (assim como SEP) versus ISR, entretanto sem deslocar nem alterar sua escala. Usualmente as curvas obtidas nesses cenários tendem à curva no cenário corrompido puramente por ruído térmico. Conforme o teorema central do limite, espera-se uma semelhança entre os desempenhos nos cenários ruidoso e interferente, desde que este último seja constituído de um grande número de iERBs.

A curva referenciada como *additive white Gaussian noise* (AWGN) é inserida no gráfico para representar o desempenho diante de cenário puramente ruidoso. Assim, esse curva AWGN refere-se ao caso hipotético em que a interferência cocanal pode ser vista conforme uma distribuição gaussiana. De modo a calcular esta RBEP, extrapolou-se o uso da expressão de probabilidade de erro de bits para modulação QPSK concebida para cenário corrompido puramente por ruído térmico. Assim, de Tse

& Viswanath (2005):

$$RBEP = 10 \log_{10} \left\{ Q \left(\sqrt{SIR} \right) \right\}, \quad (4.6)$$

onde $Q(z) \triangleq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\lambda^2/2} d\lambda$, para $z \geq 0$, é a probabilidade da cauda da distribuição normal.

Baseado na Figura 4.10, a Figura 4.11 e a Figura 4.12 realçam o uso das modulação BPSK (do inglês, *binary phase-shift keying*) e 64-QAM, respectivamente, para 1, 2, 3, e 20 iERBs. Comparando-se tais figuras, percebe-se que para ordens mais altas da modulação interferente, os degraus tornam-se tão curtos na média que as curvas se aproximam muito bem da curva AWGN. Observação semelhante pode ser obtida quando o número de fontes interferentes vai a infinito: mais fontes interferentes fazem com que o formato da curva suavize-se, aproximando-a da AWGN. Por outro lado, um número pequeno de fontes interferentes pode levar a degraus maiores na curva, cujas alturas (variação RBEP imediatamente em torno de um valor fixo de ISR) e profundidades (faixa de valores de ISR em que a RBEP mantém-se constante) são dependentes do número de fontes interferentes e das modulações e potências alocadas para estas.

4.3 Mapeamento da SINR Efetiva

O mapeamento da SINR efetiva, ou simplesmente ESM (do inglês, *effective SINR mapping*), é uma família de interfaces L2S baseada na compressão da medida de qualidade de um canal multidimensional [Brueninghaus et al. 2005]. Diferente das interfaces do valor médio⁶ [Olofsson et al. 1997, Holma 2003], a interface baseada em ESM leva em conta as condições instantâneas do canal, o que a torna uma abordagem atraente.

Usualmente a interface ESM opera em um esquema de dois estágios, como mostrado na Figura 4.13. O primeiro estágio da ESM se dedica à *compressão da SINR*, visto que a medida da qualidade de canal multidimensional é resumida em um escalar. O segundo estágio é o do *mapeamento da qualidade*, no qual o escalar é mapeado para uma dada métrica, tal como vazão ou probabilidade de erro de bit, de pacote ou de

⁶Interface do valor médio se refere à família de interfaces que realizam o mapeamento da medida de qualidade do canal para alguma métrica de desempenho do enlace (e.g. *block error probability* (BLEP)), onde essa medida é dada pelo média aritmética ou geométrica das amostras de SINR tomadas em diferentes instantes de tempo juntamente ou não do desvio padrão dessas mesmas amostras [Stancanelli et al. 2009].

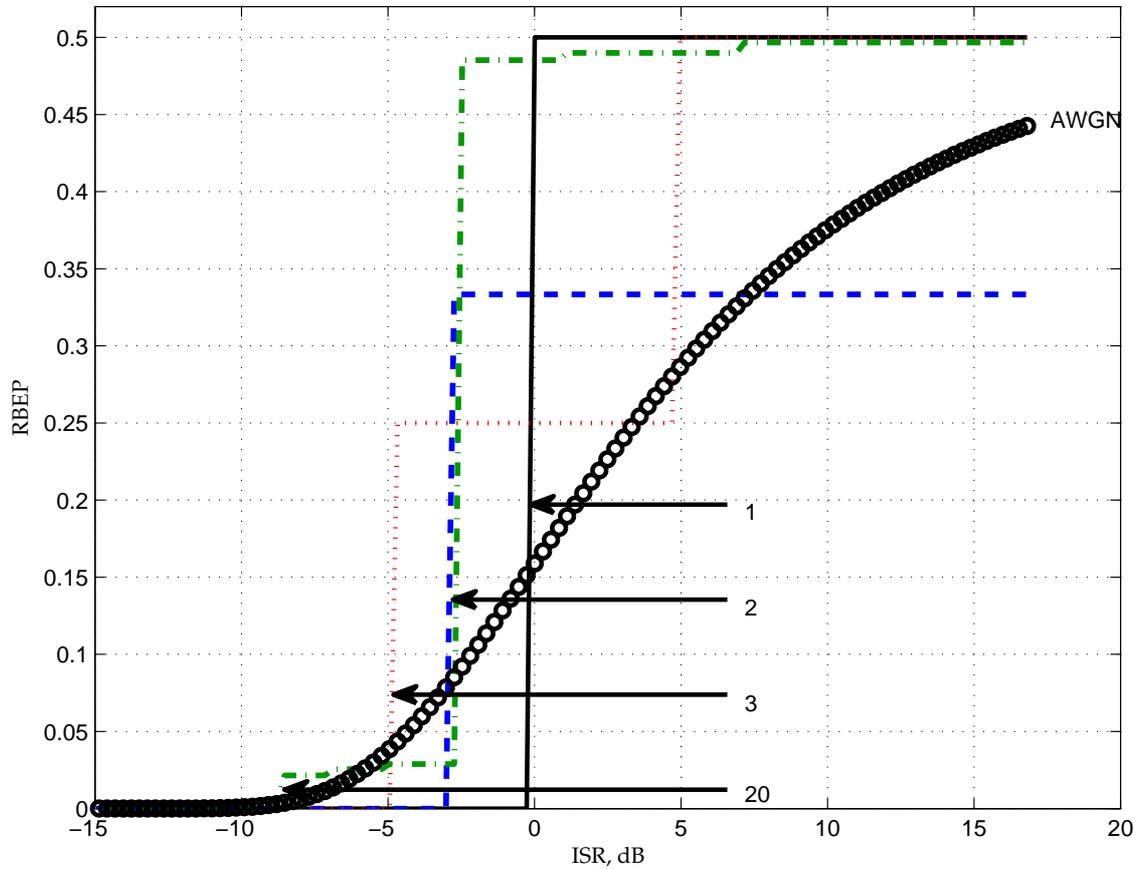


Figura 4.11: RBEP para transmissão através de modulação QPSK diante de cenários puramente interferentes com 1, 2, 3, ou 20 iERBs, todas transmitindo com mesma modulação BPSK e potência.

bloco.

Seja γ_k a medida de SINR da k -ésima subportadora, com o estado do ambiente compreendendo todas as K subportadoras assinaladas, sendo representado por $\gamma = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ \dots \ \gamma_K]^T$ ⁷. O estágio da compressão da SINR leva a uma qualidade efetiva do canal em termos de SINR, γ_{eff} , dada por [Brueninghaus et al. 2005]:

$$\gamma_{eff} = \alpha I^{-1} \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I \left(\frac{\gamma_k}{\beta} \right) \right), \quad (4.7)$$

onde $I(\cdot)$ é a medida de informação [Tsai & Soong 2003], α e β são parâmetros a serem ajustados para cada esquema de modulação e codificação MCS (do inglês, *modulation and coding scheme*).

⁷De maneira alternativa, o vetor de entrada pode ser definido sobre outra dimensão, como a das antenas de um sistema MIMO.

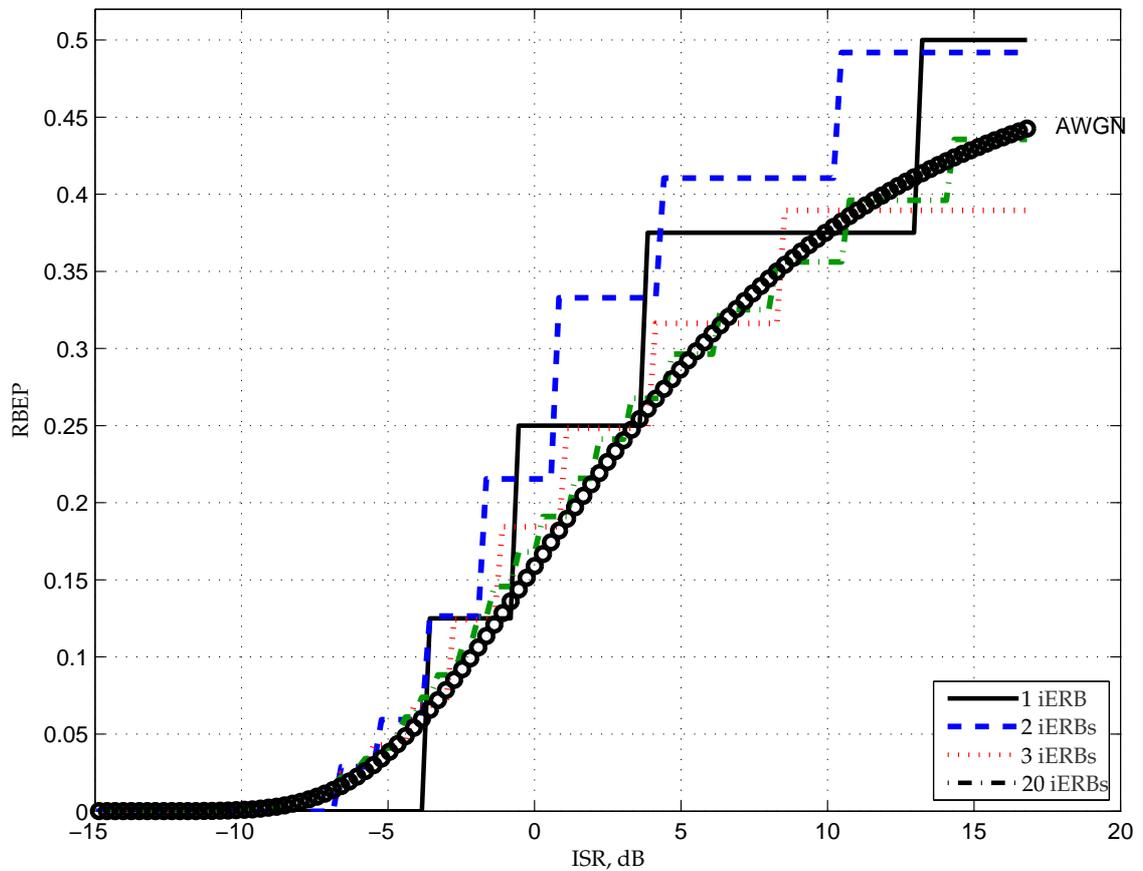


Figura 4.12: RBEP para transmissão através de modulação QPSK diante de cenários puramente interferentes com 1, 2, 3, ou 20 iERBs, todas transmitindo com mesma modulação 64-QAM e potência.

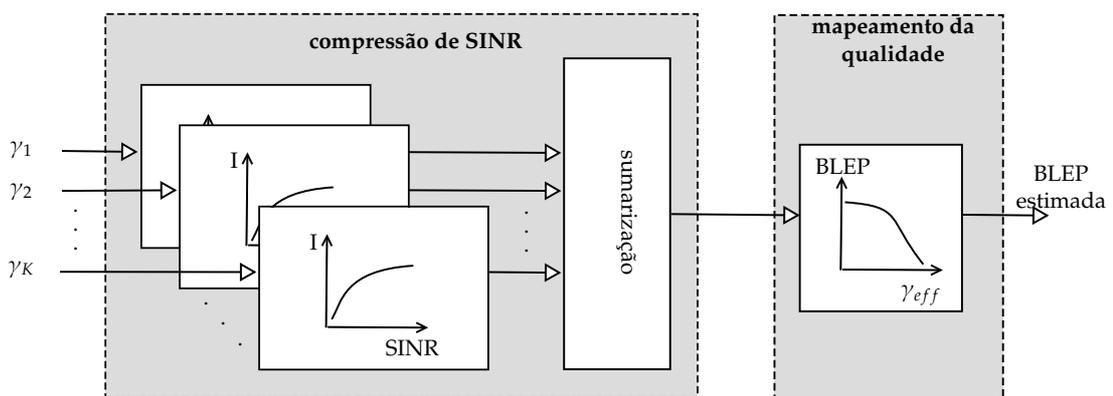


Figura 4.13: Princípio do mapeamento ESM para interface L2S.

Dentre uma variedade de versões da interface L2S baseada no princípio do ESM, como as elencadas em Brueninghaus et al. (2005), as duas principais são a exponencial

e a baseada na informação mútua, EESM e MIESM, respectivamente. No relatório do projeto WINNER [Alexiou et al. 2005], discorre-se a respeito da superioridade do MIESM, em termos de exatidão, com relação à EESM para MCSs mais altas. Entretanto, mais recentemente, em Hanzaz & Schotten (2011), mostra-se que EESM e MIESM apresentam desempenhos semelhantes. Latif et al. (2012) recorreram a um cenário multiusuário (MU)-MIMO para mostrar a superioridade da interface MIESM. Há de se ressaltar que a interface MIESM é preferível para casos que envolvam alocação não igualitária de potência e de modulação, ao longo das subportadoras de um mesmo usuário, tal como estudado em Tuomaala & Wang (2005b) e Cheng (2006). Ainda assim, tem-se realizado esforços na intenção de sanar tais limitações na abordagem EESM, como por exemplo em Long et al. (2008). Em contrapartida, a implementação da interface MIESM é acometida de substanciais dificuldades suplementares. Em especial, a obtenção dos mapas de qualidade no segundo estágio, os quais mapeiam valores de RBIR (do inglês, *received bit information rate*) para valores de *block error probability* (BLEP) (ou qualquer outra métrica de desempenho do enlace que esteja no foco da aplicação) para cada taxa de codificação e tamanho de bloco, bem como os parâmetros de calibração da interface como no caso EESM, passam a ter enorme demanda para casos em que um protocolo ARQ híbrido esteja atuando. Esse tipo de aplicação é descrito na dissertação de Quiroga (2008). De fato, técnicas de combinação suave das versões de retransmissão levam a uma infinidade de possíveis valores de taxa efetiva de codificação, expandindo os mapas de qualidade.

Por conta de vários fatores, a interface EESM foi a única considerada nesta tese, a começar por sua simplicidade em relação à MIESM. Além do mais, a MIESM sofre de dependência similar à sumarização que mescla potências interferente e de ruído térmico. Por último, mas não menos importante, tem-se a ampla adoção da EESM nos trabalhos científico [Lei et al. 2007, Tamimi 2007, Ikuno et al. 2010, Tao & Czulwik 2011], além de estudos dedicados ao aprofundamento no tópico, caracterizando as distribuições envolvidas em Song et al. (2011) e Donthi & Mehta (2011).

Na versão EESM da interface L2S, a medida de informação é dada por:

$$I_{EESM}(\gamma_k) = 1 - \exp(-\gamma_k). \quad (4.8)$$

Daí,

$$I_{EESM}^{-1}(y) = -\ln(1 - y). \quad (4.9)$$

substituindo (4.8) em (4.7), e, na sequência, aplicando (4.9), obtém-se γ_{eff}

$$\gamma_{eff} = -\alpha \ln \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \exp \left(-\frac{\gamma_k}{\beta} \right) \right). \quad (4.10)$$

A Figura 4.14 ilustra o mapeamento da qualidade como um gráfico de dispersão, onde cada ponto representa um par de γ_{eff} e $BLEP$ obtido a partir de campanha de simulação do enlace; portanto, a curva representa o mapeamento da qualidade que sumariza tais resultados de uma maneira simples para as simulações sistêmicas.

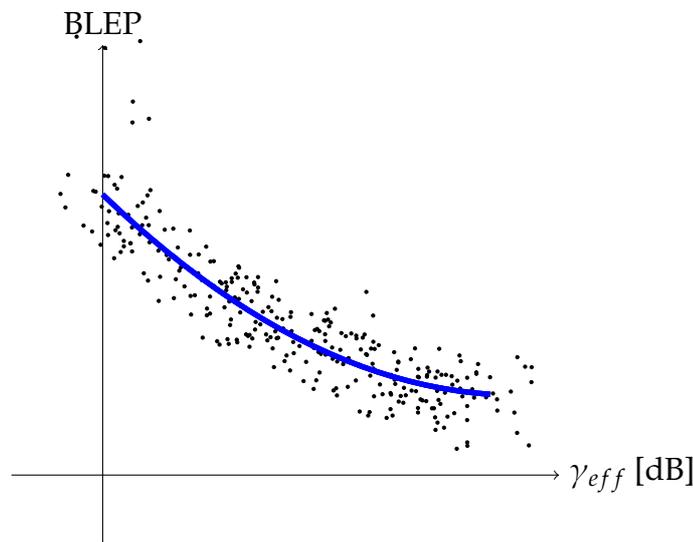


Figura 4.14: A relação entre as medidas γ_{eff} e $BLEP$ estabelecidas pela interface EESM L2S e curva de mapeamento de qualidade.

A função que define o mapeamento da qualidade pode ser obtida por meio de regressão sobre o conjunto das amostras dos dados ou representada pela curva AWGN de desempenho [Brueninghaus et al. 2005, Tuomaala & Wang 2005, Pauli et al. 2004]. A prova do último, baseada no limitante de Chernoff, pode ser obtida em Pauli et al. (2004). A regressão é apontada por Brueninghaus et al. (2005) como mais apropriada para promover um ajuste melhor da curva de mapeamento da qualidade ao longo dos valores de BLEP disponibilizados, consistindo, portanto, no método aqui adotado. A regressão com polinômio de P -ésima ordem sobre o conjunto de dados com N amostras pode ser obtida como se segue.

Considere que a cada amostra n , a SINR efetiva $\gamma_{eff}(n)$ seja conhecida para um valor fixo do par $\langle \alpha, \beta \rangle$ e a BLEP resultante $p(n)$. Pode-se então proceder com a seguinte

resolução:

$$p(n) = w_0 + w_1\gamma_{eff}(n) + w_2\gamma_{eff}^2(n) + \dots + w_P\gamma_{eff}^P(n) \quad (4.11)$$

para todas as amostras $n = 1, 2, \dots, N$.

Defina-se então

$$\mathbf{p} = [p(1) \ p(2) \ \dots \ p(n) \ \dots \ p(N)]^T, \quad (4.12)$$

$$\mathbf{w} = [w_0 \ w_1 \ w_2 \ \dots \ w_P]^T, \quad (4.13)$$

e a matriz de Vandermonde

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_{eff}(1) & \gamma_{eff}^2(1) & \dots & \gamma_{eff}^P(1) \\ 1 & \gamma_{eff}(2) & \gamma_{eff}^2(2) & \dots & \gamma_{eff}^P(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \gamma_{eff}(n) & \gamma_{eff}^2(n) & \dots & \gamma_{eff}^P(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \gamma_{eff}(N) & \gamma_{eff}^2(N) & \dots & \gamma_{eff}^P(N) \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

Obtém-se o sistema de equações lineares:

$$\mathbf{p} = \mathbf{\Gamma}\mathbf{w}, \quad (4.15)$$

cuja solução \mathbf{w}^* para $\mathbf{\Gamma}$ é conhecida e dada por:

$$\mathbf{w}^* = (\mathbf{\Gamma}^T\mathbf{\Gamma})^{-1}\mathbf{\Gamma}^T\mathbf{p}, \quad (4.16)$$

que é equivalente à obtenção da curva artificial para minimizar a soma dos erros quadráticos dos desvios verticais a essa curva [Weisstein 2012, Weisstein 2012b].

Uma vez obtida a solução \mathbf{w}^* , pode-se estimar diretamente a BLEP a dado instante n , $\widehat{p}(n)$, para qualquer estado de ambiente, através do cálculo de $\gamma_{eff}(n)$ para um dado $\langle \alpha, \beta \rangle$, e daí

$$\widehat{p} = \left[1 \ \gamma_{eff} \ \gamma_{eff}^2 \ \dots \ \gamma_{eff}^P \right] \mathbf{w}^*. \quad (4.17)$$

No entanto, Brueninghaus et al. (2005) sugerem que se faça a regressão sobre o conjunto de dados disposto na forma e escala $\langle SINR_{eff}(\alpha, \beta), \ln p \rangle$, de modo a obter um ajuste da curva ao longo de todos os valores de BLEP, desde que para estes seja assegurado um valor de piso. Levando-se em conta que o custo computacional para obter um certo número de erros, através do método de Monte Carlo, aumenta com a redução da taxa de erros alvo [Jeruchim et al. 2000], e observando a faixa de valores de

interesse, pode-se considerar, por exemplo, um valor de piso de BLEP de $p_{piso} = 10^{-4}$. Portanto, caso seja observado algum valor inferior a esse piso, o valor de piso será tomado em seu lugar. Assim, (4.16) e (4.17) podem ser reescritas para a regressão no domínio logarítmico, respectivamente, como:

$$\mathbf{w}^* = (\mathbf{\Gamma}^T \mathbf{\Gamma})^{-1} \mathbf{\Gamma}^T \ln \mathbf{p}, \quad (4.18)$$

e

$$\widehat{p} = \exp \left[1 \quad \gamma_{eff} \quad \gamma_{eff}^2 \quad \cdots \quad \gamma_{eff}^P \right] \mathbf{w}^*. \quad (4.19)$$

onde as funções $\ln(\cdot)$ e $\exp(\cdot)$ são aplicadas elemento a elemento do vetor no argumento. A interface L2S considerada pode ser avaliada em termos de erro quadrático médio (EQM) calculado sobre todas as estimativas, $EQM_e = \frac{1}{2N} \sum_n |p(n) - \widehat{p}(n)|^2$.

Esse procedimento deve ser repetido para vários pares $\langle \alpha, \beta \rangle$, escolhendo-se aquele para o qual a EQM_e assuma o menor valor; a partir deste par obtém-se a \mathbf{w}^* definitiva e então diz-se que a interface está calibrada. Questões relacionadas a calibração são discutidas em profundidade em Westman (2006), além de alguns pontos relevantes serem posteriormente apontados em He et al. (2007), Cipriano et al. (2008), Stancanelli et al. (2009) e Hanzaz & Schotten (2011). Diferentes pares de valores de parâmetros são associados a cada par de MCS m e tamanho de bloco b , $\langle \alpha^*; \beta^* \rangle_{m,b}$.

A adequada realização de uma interface L2S do tipo EESM requer tanto a compressão dos vetores de SINR como a subsequente compilação da curva artificial. A calibração deve ser explorada de modo a assegurar o apropriado funcionamento da interface como um todo. Essa calibração é conseguida através do ajuste dos parâmetros α e β , ou, mais comumente, do parâmetro β , desde que $\alpha = \beta$. Usualmente, procede-se à busca do valor de β que leve ao menor valor de EQM_e . Uma série de valores de β são considerados para o cálculo do EQM_e , sendo que para cada um dos quais procede-se o ajuste da curva artificial acima descrito.

4.3.1 EESM diante de condições adversas

De fato, a interface L2S baseada no modelo EESM é bastante útil e confiável na condição de que a interferência seja desprezível ou ao menos apresente função densidade de probabilidade gaussiana. Caso contrário, a medida SINR não mais será uma entrada apropriada para o estágio de compressão, visto que diferentes cenários interferentes com igual γ_{eff} podem ser confundidos entre si.

A Figura 4.15 ilustra o comportamento da EESM diante de condição adversa, na qual dois diferentes níveis de potência interferente podem estar presentes. Os marcadores preenchidos representam um cenário com um certo nível de potência interferente, enquanto que os marcadores vazios representam o cenário com outro nível de potência interferente. Note que, enquanto γ_{eff} é a mesma, a BLEP resultante pode ser diferente para cada cenário interferente. Seguindo o procedimento apresentado nesta seção, uma simples curva para o mapeamento da qualidade é dada por \mathbf{w}^* , e, portanto, uma interface L2S provavelmente não será apropriadamente construída, visto que a predição de \hat{p} por (4.17) ou (4.19) não remeterá a nenhum dos dois cenários interferentes, mas sim a um cenário intermediário (inexistente quando da construção do modelo).

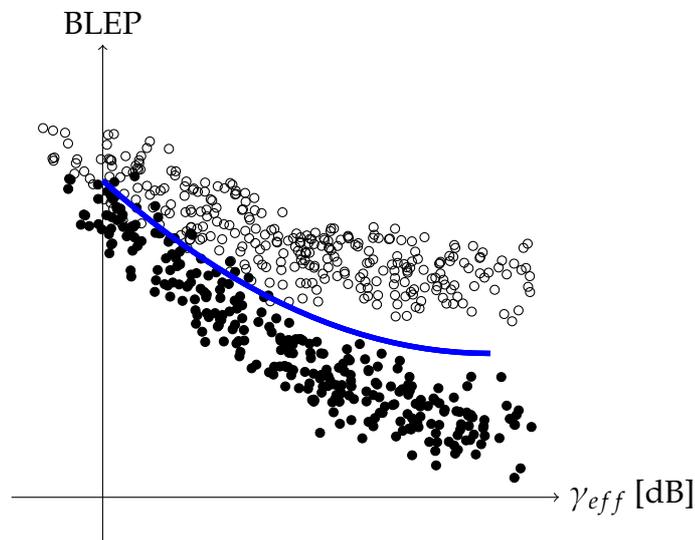


Figura 4.15: Comportamento da interface baseada no mapeamento EESM diante de condição adversa, na qual há dois possíveis níveis para a potência interferente diferenciados pelo uso dos marcadores preenchidos e vazios.

Há algumas ocasiões em que uma ligeira inexatidão da interface L2S pode levar a uma degradação substancial no desempenho em nível de sistema. Como exemplo, citam-se os algoritmos de adaptação de enlace dependentes de alguns tipo de mapeamento por interface L2S em tempo de execução como meio de decidir qual MCS leva à máxima vazão, tal como as soluções LA3 e LA4 concebidas especialmente para sistemas OFDM [Ruberg 2006]. A escolha da MCS é passo crucial para os algoritmos de adaptação de enlace, visto que uma seleção inadequada da MCS afetará diretamente a vazão, levando a uma perda na eficiência espectral sistêmica.

4.4 Abordagem neural para interface L2S

De maneira alternativa, a tarefa envolvida na realização de uma interface L2S pode ser interpretada tal como a tarefa clássica de identificação de planta⁸. A ferramenta LL é a planta a ser identificada, a qual fornece uma série de dados de entrada-saída obtidos a partir de simulações. Como pode ser visto na Figura 4.16, um modelo adaptativo apropriado é colocado em paralelo a uma planta desconhecida, ficando sujeito às mesmas entradas $\dot{\gamma}$. A saída da planta, uma série de valores de BLEP neste caso, é acompanhada por um algoritmo de aprendizagem, com base no sinal de erro.

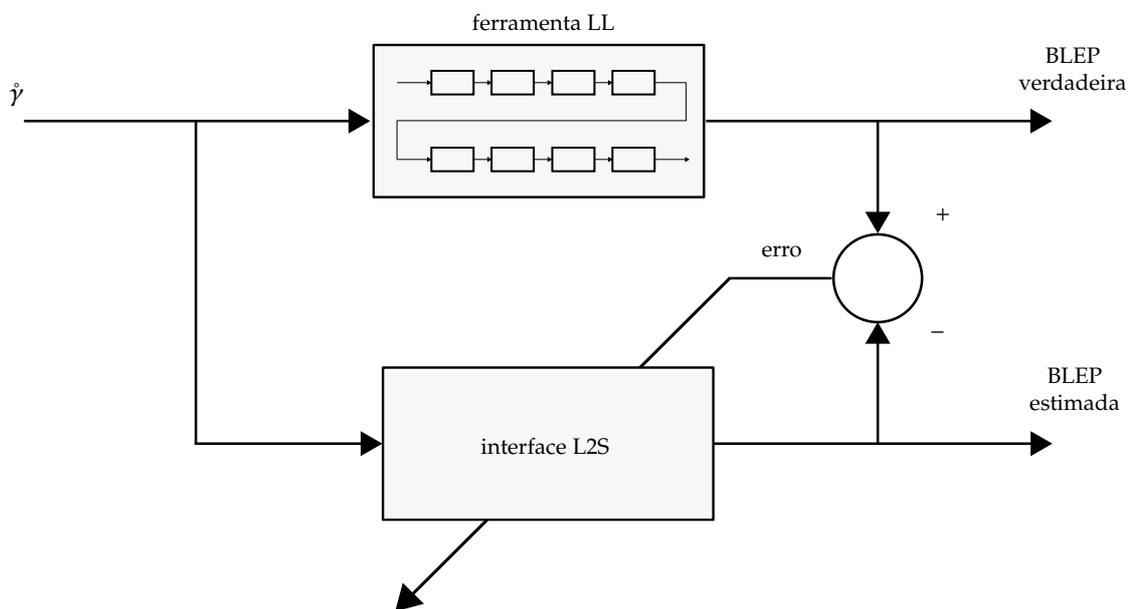


Figura 4.16: A interface L2S vista como um problema básico de identificação de planta.

As RNAs consistem na ferramenta aqui adotada para lidar com esse problema de identificação de planta. RNAs são um tipo de máquina adaptativa cujo desenvolvimento vem se fundamentando em diversos ramos do conhecimento, tais como neurociências, matemática e engenharia [Haykin 2008]. As RNAs têm sua concepção inspirada no processamento de sinais realizado pelo cérebro humano, utilizando-se de várias unidades de processamento. A RNA segue um modelo que descreve as conexões sinápticas entre os neurônios bem como o fluxo de comunicação através destes. Corpo de célula, dendritos e axônio são combinados ao processamento de impulsos nervosos em um simples modelo matemático denominado neurônio

⁸Neste trabalho, o termo *planta* é usado para se referir a sistema em um sentido mais amplo, cujo modelo é desconhecido *a priori*.

artificial [Haykin 2008]. Os estímulos são apresentados a um conjunto de conexões ligadas à entrada, cada uma das quais caracterizada por seu peso sináptico.

A operação básica do neurônio artificial consiste em somar as entradas ponderadamente e passar o resultado através de uma função de ativação, assim determinando o sinal de saída. Vários neurônios podem ser interconectados de modo que uma rede tome forma, cujos nós podem ser compostos por um ou alguns neurônios. Os nós são posicionados cuidadosamente ao longo da rede, permitindo-se uma multiplicidade de arranjos tais como em cascata e em paralelo, bem como há um sem número de possibilidades de conexões intra- e intercamadas. Entretanto, aqui, restringimo-nos a arranjos clássicos, conforme descrito nas próximas seções.

Aprendizagem é o processo pelo qual os parâmetros livres da RNA são adaptados. O escopo deste capítulo limita-se ao aprendizado supervisionado, i.e. aquele em que há um tutor conhecedor de um conjunto de exemplos de pares entrada-saída. Através do processo de aprendizagem, a RNA é capaz de reter conhecimento concernente ao ambiente ao seu redor, e, por consequência pode ser treinada para responder, interpretar ou predizer de alguma maneira previamente estipulada. Se uma dada entrada não foi apresentada durante o treinamento, mesmo assim a RNA poderá produzir uma saída razoável na tentativa de generalizar o conhecimento retido a partir de outras entradas observadas durante o treinamento.

Uma RNA pode ser empregada para aprender o comportamento de uma ferramenta LL e, em seguida, com seus pesos fixos, estará habilitada a substituir a tabela de busca junto da ferramenta SL. Desse modo, a ferramenta SL terá à disposição uma espécie de réplica da ferramenta LL, em termos funcionais, aproximando-se do comportamento de um simulador completo. Sempre que a ferramenta SL solicitar, essa RNA treinada a proverá com a predição de desempenho de enlace em resposta a um estado do ambiente.

A seguir, descreve-se o método de construção de modelos de ferramenta LL através das RNAs, derivando-se a interface doravante denominada *neural link-to-system interface* (nL2Si). A abordagem relaciona as medidas multidimensionais de canal diretamente às estimativas de BLEP, como um mapeamento não linear $\mathbb{R}^S \mapsto \mathbb{R}$, onde S refere-se ao comprimento da camada de entrada. O estado do ambiente é representado pelo vetor expandido \hat{y} , compreendendo tanto o vetor da razão sinal-ruído, SNR (do inglês, *signal-to-noise ratio*), \hat{y} , como o vetor da razão interferência-ruído, INR (do inglês,

interference-to-noise ratio), $\check{\gamma}$, a partir de todas as K subportadoras:

$$\dot{\gamma} = [\hat{\gamma}^T \quad \check{\gamma}^T]^T, \quad (4.20)$$

assim, $S = 2K$. Não obstante, a nova abordagem requer que as medidas dos pares $\langle \dot{\gamma}(n), p(n) \rangle$ sejam tomadas a curtos intervalos de tempo, de modo a favorecer a captura do comportamento dinâmico da BLEP.

Há uma grande variedade de tipos de RNA, como discutido cuidadosamente no livro de Haykin (2008). Sem excluir outras realizações de RNA, a ideia da nL2Si aqui proposta segue as modelagens do combinador linear adaptativo (CLA) e do *multilayer perceptron* (MLP).

4.4.1 Combinador Linear Adaptativo

O combinador linear adaptativo (CLA) descrito por Widrow & Lehr (1990) é composto de um simples neurônio artificial, como mostrado na Figura 4.17.

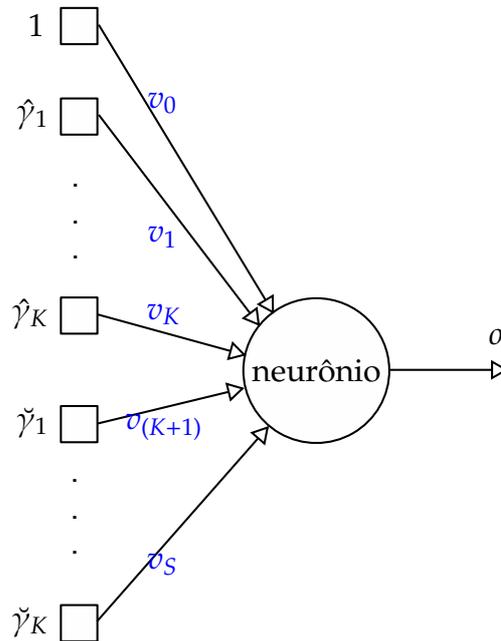


Figura 4.17: Modelo do combinador linear adaptativo (CLA) [Widrow & Lehr 1990].

O vetor $\mathbf{x}(n) = [1 \quad \dot{\gamma}(n)^T]^T$ é apresentado à entrada, sendo calculada a saída $o(n)$ do neurônio como:

$$o(n) = \mathbf{v}(n)^T \mathbf{x}(n), \quad (4.21)$$

onde $\mathbf{v}(n) = [v_0 \quad \dots \quad v_S]^T$ refere-se ao vetor de pesos.

Tomando-se os valores de erros $e(n) = p(n) - o(n)$ gerados para todas as N amostras de entrada-saída apresentadas $\langle \hat{y}(n), p(n) \rangle$, onde $p(n)$ consiste na saída desejada no instante n em termos de BLEP, o EQM pode ser calculado por:

$$EQM_{cla} = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N e(n)^2. \quad (4.22)$$

O vetor de pesos \mathbf{v} pode ser iterativamente ajustado através da regra delta *Widrow-Hoff*, também denominada algoritmo gradiente estocástico [Widrow & Lehr 1990, Widrow 2005, Haykin 2008]. Trata-se de uma variante do *algoritmo descida-mais-íngreme* concebida para minimizar o erro quadrático instantâneo, i.e.

$$\min_{\mathbf{v}} \xi(n) = \frac{1}{2} e^2(n), \quad (4.23)$$

tornando o cálculo do vetor gradiente uma tarefa simples e desprendida de qualquer conhecimento estatístico do ambiente [Haykin 2008]. Desse modo, o vetor de pesos será atualizado utilizando a simples expressão matemática:

$$\mathbf{v}(n+1) = \mathbf{v}(n) - \eta \frac{\partial e^2(n)}{\partial \mathbf{v}} \quad (4.24a)$$

$$= \mathbf{v}(n) - \eta e(n) \frac{\partial (p(n) - \mathbf{v}(n)^T \mathbf{x}(n))}{\partial \mathbf{v}} \quad (4.24b)$$

$$= \mathbf{v}(n) + \eta e(n) \mathbf{x}(n), \quad (4.24c)$$

onde $0 < \eta < 1$ é denominada taxa de aprendizagem. Vale ainda ressaltar que o algoritmo poder ser simplesmente inicializado com $\mathbf{v}(0) = \mathbf{0}$.

4.4.2 Multilayer Perceptron

O *perceptron* multicamadas MLP (do inglês, *multilayer perceptron*) consiste em uma das mais versáteis e clássicas realizações de uma RNA, sendo composto por vários neurônios artificiais dispostos em diferentes camadas: entrada, oculta e saída. Diferentemente do CLA descrito brevemente na seção 4.4.1, o projeto de uma rede MLP recai na decisão de uma série de parâmetros, em geral cruciais para o bom desempenho do preditor, tais como número de camadas ocultas, número de neurônios em cada camada e funções de ativação. O empirismo é preponderante nesse ponto, apontando

as funções de ativação do tipo sigmoidal⁹ como desejáveis para a atual aplicação: tangente hiperbólica, $\varphi(\cdot)$, para as camadas ocultas, e logística para a camada de saída, $\psi(\cdot)$, respectivamente descritas em Haykin (2008), por

$$\varphi(y) = 1,716 \tanh(0,667 y), \quad (4.25)$$

e

$$\psi(y) = \frac{1}{1 + \exp(-ay)}. \quad (4.26)$$

O parâmetro a deve ser escolhido de acordo com o número de neurônios na última camada oculta de modo a favorecer a exploração do domínio da função de ativação de saída.

O teorema da aproximação universal pode ser moldado ao contexto das redes MLP, afirmando que uma única camada oculta é suficiente para se assegurar um certo erro uniforme de aproximação para um dado conjunto de treinamento e uma dada saída desejada, desde que a função a ser aproximada seja contínua, limitada, não-constante e monotonicamente crescente [Haykin 2008]; segundo Hassoun (1995), através da MLP pode-se expressar qualquer função contínua multivariável. Entretanto, trata-se de um teorema de existência, que não determina qual a configuração da rede e nem mesmo assegura que uma única camada oculta seja a configuração ótima em termos de tempo, facilidade de implementação e capacidade de generalização [Haykin 2008]. A seguir são investigadas configurações de MLP considerando uma e duas camadas ocultas, esta última simplificada utilizando o mesmo número de neurônios em ambas as camadas ocultas, conforme Villiers & Barnard (1992). Pelo fato de o modelo com duas camadas ocultas ser mais geral, sua descrição será tomada como referência, como ilustrado na Figura 4.18, com I sendo o número de neurônios artificiais tanto na primeira quanto na segunda camada oculta.

Os vetores de pesos assinalados para cada neurônio i da primeira camada oculta, na iteração n , são representados como

$$\mathbf{v}_i(n) = [v_{i0}(n) \quad v_{i1}(n) \quad \cdots \quad v_{iS}(n)]^T, \quad (4.27)$$

e a cada neurônio j da segunda camada oculta

$$\mathbf{w}_j(n) = [w_{j0}(n) \quad w_{j1}(n) \quad \cdots \quad w_{jI}(n)]^T, \quad (4.28)$$

⁹Para os fins deste texto, o tipo sigmoidal refere-se a funções monotônicas de uma única variável, suaves, contínuas e assintoticamente limitadas.

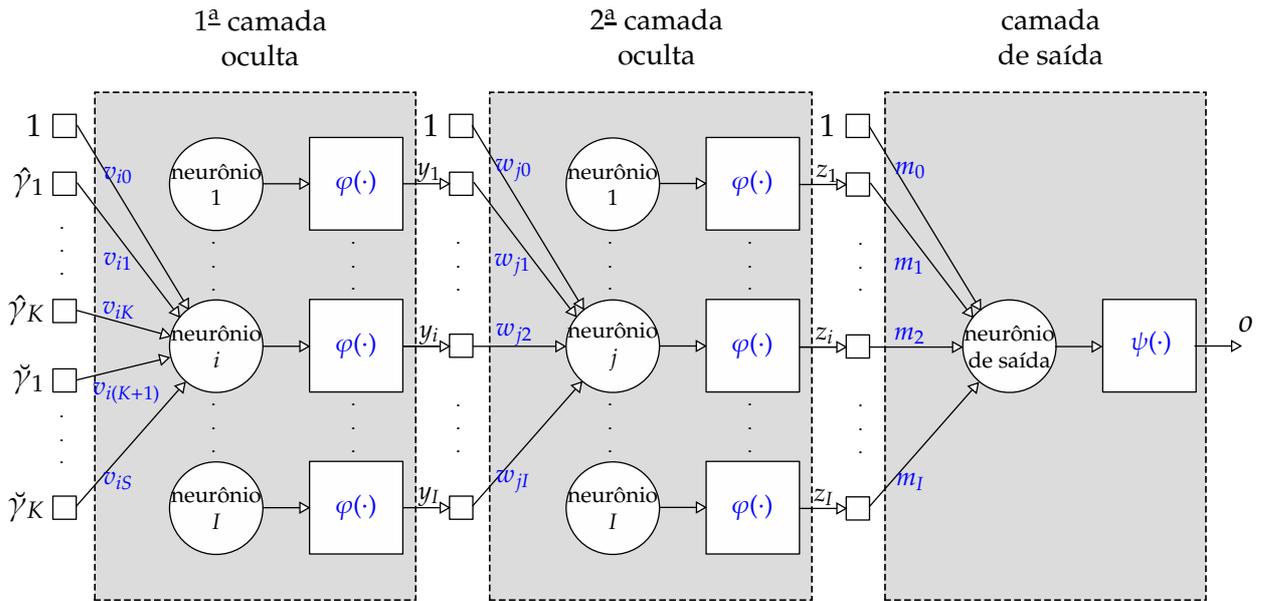


Figura 4.18: O esquema básico de uma nL2Si.

e o vetor de pesos assinalado ao neurônio da camada de saída

$$\mathbf{m}(n) = [m_0(n) \quad m_1(n) \quad \dots \quad m_I(n)]^T. \quad (4.29)$$

Os sinais gerados nas primeira e segunda camadas ocultas são, respectivamente, representados por:

$$\mathbf{y}(n) = [y_1(n) \quad y_2(n) \quad \dots \quad y_I(n)]^T, \quad (4.30)$$

e

$$\mathbf{z}(n) = [z_1(n) \quad z_2(n) \quad \dots \quad z_I(n)]^T. \quad (4.31)$$

Todos os neurônios podem ser treinados através do algoritmo de retropropagação, o qual inclui a regra delta *Widrow-Hoff* (vide seção 4.4.1) como um caso especial [Haykin 2008]. A execução do algoritmo de retropropagação compreende duas fases principais: avanço e retorno.

Na fase de avanço, o vetor de entrada na iteração n , $\hat{\gamma}(n)$, é apresentado à camada de entrada, daí propagando-se à frente, camada a camada, até a de saída. As respostas dos neurônios da primeira camada oculta podem ser obtidas como:

$$y_i(n) = 1,716 \tanh \left(0,667 \mathbf{v}_i^T(n) \begin{bmatrix} 1 \\ \hat{\gamma}(n) \end{bmatrix} \right), \quad i = 1, \dots, I. \quad (4.32)$$

Esse procedimento é repetido para os neurônios da segunda camada oculta, resultando na seguinte resposta neural:

$$z_j(n) = 1,716 \tanh \left(0,667 \mathbf{w}_j^T(n) \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{y}(n) \end{bmatrix} \right), \quad j = 1, \dots, I. \quad (4.33)$$

E repetido novamente para a camada de saída

$$o(n) = \psi \left(\mathbf{m}^T(n) \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{z}(n) \end{bmatrix} \right). \quad (4.34)$$

Ao final da fase de avanço, computa-se o valor do EQM por:

$$EQM_{mlp} = \frac{1}{2N} \sum_n^N |p(n) - o(n)|^2. \quad (4.35)$$

Visto que $p(n)$ refere-se ao valor verdadeiro da BLEP no instante n , a saída $o(n)$ assumirá o significado de BLEP estimada para o instante n .

A fase de retorno da rede MLP envolve os cálculos dos gradientes locais para a adaptação dos pesos dos neurônios das camadas ocultas e de saída. Como nesta aplicação apenas um neurônio artificial se faz presente na saída, a função custo $\xi(n)$ a ser minimizada será similar àquela descrita para o CLA em (4.23). Os detalhes dos cálculos envolvidos para atualização dos pesos na fase de retorno do algoritmo de retropropagação são apresentados no Apêndice 6.

4.4.3 Metodologia de construção dos modelos

A construção do modelo da ferramenta LL através das RNAs segue alguns preceitos básicos frequentemente apontados pela literatura especializada [Haykin 2008, Marques 2005], os quais foram adaptados às características da aplicação em questão. Assim que os dados são disponibilizados para o treinamento da RNA, o único tipo de normalização adotado para entrada refere-se à componente mais expressiva em termos de potência média: a potência média dessa entrada é ajustada à unidade por meio de um fator de normalização e todas as demais são ajustadas segundo esse mesmo fator. Visto que a preservação da proporção entre a energia das entradas é crucial para o estudo em questão, bem como manter inalterado o regime temporal de cada uma das entradas, nenhum outro tipo de normalização foi implantado para as entradas da rede. Para os dados referentes ao sinal de saída, que pela natureza da métrica adotada de taxa de

erro de blocos estão compreendidos na faixa dos números reais entre 0 e 1, pode-se reduzir ligeiramente sua escala para evitar que o algoritmo de retropropagação trabalhe sobre a região de saturação da função logística. Procede-se então por uma simples transformação linear que leve os valores BLEP no treinamento à faixa entre 0,05 e 0,95.

O treinamento da RNA é realizado exemplo a exemplo, de maneira sequencial, onde um dado exemplo ocorrendo no instante n_e é apresentado na forma $\langle \mathbf{x}(n_e), p(n_e) \rangle$. A sequência de apresentação dos exemplos segue uma ordem aleatória. A apresentação de todos os exemplos disponíveis para o treinamento consiste em uma época de treinamento. Usualmente procede-se o treinamento com diversas épocas consecutivas, as quais se diferenciam justamente pelo embaralhamento dos exemplos. Desse modo, o processo de atualização de pesos governado por esse algoritmo torna-se menos propenso a estagnar-se em um ponto de mínimo local. Adicionalmente, o modo sequencial de treinamento gera uma menor demanda por armazenamento se comparado ao modo em lote.

No caso das RNAs, a mais apropriada estratégia de treinamento não consiste tão somente na minimização do EQM sobre o conjunto de treino (expressões 4.22 e 4.35). Após treinada, à RNA serão apresentados vetores de entrada muito provavelmente não conhecidos durante a fase de treinamento. Para reduzir as chances de correlação temporal entre os conjuntos de dados de treinamento e de testes, sobretudo nos canais rádio, determina-se uma separação entre ambos. Portanto, os dados compreendidos nesse intervalo de separação não são apresentados durante o treinamento, nem mesmo durante o teste da RNA; não obstante, esses dados formam um novo conjunto denominado dados de validação. A cada época de treinamento, avalia-se o EQM para os dados de validação. Trata-se de uma tentativa de estimar a capacidade de generalização da RNA. Com base em algumas tentativas independentes de treinamento da RNA – portanto, diferentes embaralhamentos dos exemplos apresentados –, observam-se as curvas do EQM de validação versus o número de épocas de treinamento. O número de épocas de treinamento a ser adotado para o treinamento definitivo é o maior possível antes que quaisquer das curvas do EQM de validação apresentem uma tendência de crescimento.

No caso particular das redes MLP, adotou-se ainda o método dos momentos, o qual consiste em adicionar, de maneira ponderada, a variação dos pesos na iteração anterior à variação dos pesos na iteração atual. Desse modo, abrandam-se prováveis variações bruscas na direção de atualização dos pesos em prol da estabilidade. Assim como os

detalhes da fase de retorno do algoritmo de retropropagação foram deixados para o Apêndice 6, os termos matemáticos decorrentes do método dos momentos também o foram. Por fim, diferenciaram-se as taxas de aprendizagem das camadas da rede normalizando-se pelo número de conexões sinápticas de cada um de seus neurônios constituintes ao quadrado.

4.5 Simulação Computacional

Nesta seção, as interfaces L2S apresentadas até aqui – a ESM (cf. seção 4.3) e a nL2Si (cf. seção 4.4) – são avaliadas individualmente e comparadas entre si. O enlace de um sistema foi modelado em banda-base e a partir daí desenvolveu-se uma ferramenta de simulação LL exclusivamente para a geração dos dados necessários a esse tipo de avaliação, com nível de detalhamento tal que permita controlar de maneira independente a potência do sinal e a de interferência, bem como discernir o efeito de cada uma dessas parcelas no desempenho do enlace. As simulações não levam em conta modelos de mobilidade. Algumas características adotadas no 3GPP LTE foram tomadas como inspiração para a concepção da ferramenta de simulação LL, focando-se unicamente no canal de tráfego do enlace direto, o qual se baseia na tecnologia OFDM. Apesar disso, com objetivo principal de prover dados para avaliação das interfaces L2S, a ferramenta LL desenvolvida é mais simples do que as especificações 3GPP ditam, desconsiderando-se, por exemplo, mecanismos como *Rate Matching* e ARQ híbrido [3GPP 2012].

A ferramenta de simulação LL foi desenvolvida com base em programação em linguagem C++ orientada a objetos, aproveitando-se ainda muitos recursos da biblioteca IT++¹⁰. Essa ferramenta permite uma modelagem modular do enlace a ser simulado, fornecendo várias possibilidades de configuração. Entretanto, uma mesma configuração será mantida como referência, a qual será apresentada na seção 4.5.1. Aspectos concernentes a práticas de programação são completamente omitidos nesta tese, porém o leitor interessado pode encontrar detalhes do arcabouço adotado em Stancanelli et al. (2009) e Lima et al. (2006).

Outras ferramentas de simulação foram concebidas para avaliar as interfaces L2S:

¹⁰A IT++ é uma biblioteca C++ de classes e funções matemáticas, de processamento de sinais e de comunicações, concebida para prover simulações de sistemas de comunicações. Descrições, códigos fontes e exemplos da biblioteca IT++ podem ser obtidos através do endereço eletrônico <http://itpp.sourceforge.net/>.

uma para a interface EESM, outra para o CLA e uma última MLP. Todas estas ferramentas foram desenvolvidas em ambiente *MATLAB*[®].

4.5.1 Cenários

A ferramenta de simulação LL desenvolvida é capaz de criar cenários que apresentem condições adversas para a interface L2S. Os cenários simulados são baseados no caso mais severo, conforme discutido na seção 4.2: um único EU localizado na região de borda de célula, e sob a influência de duas ERBs dominantes independentes — uma sERB e uma iERB —, ambas empregando a modulação BPSK. Desse modo, espera-se que a potência média do sinal interferente recebido seja da mesma ordem de grandeza do sinal desejado, referenciadas respectivamente por P_i e P_s . A Figura 4.19 ilustra esse cenário de simulação bem como a configuração básica das cadeias de transmissão e recepção.

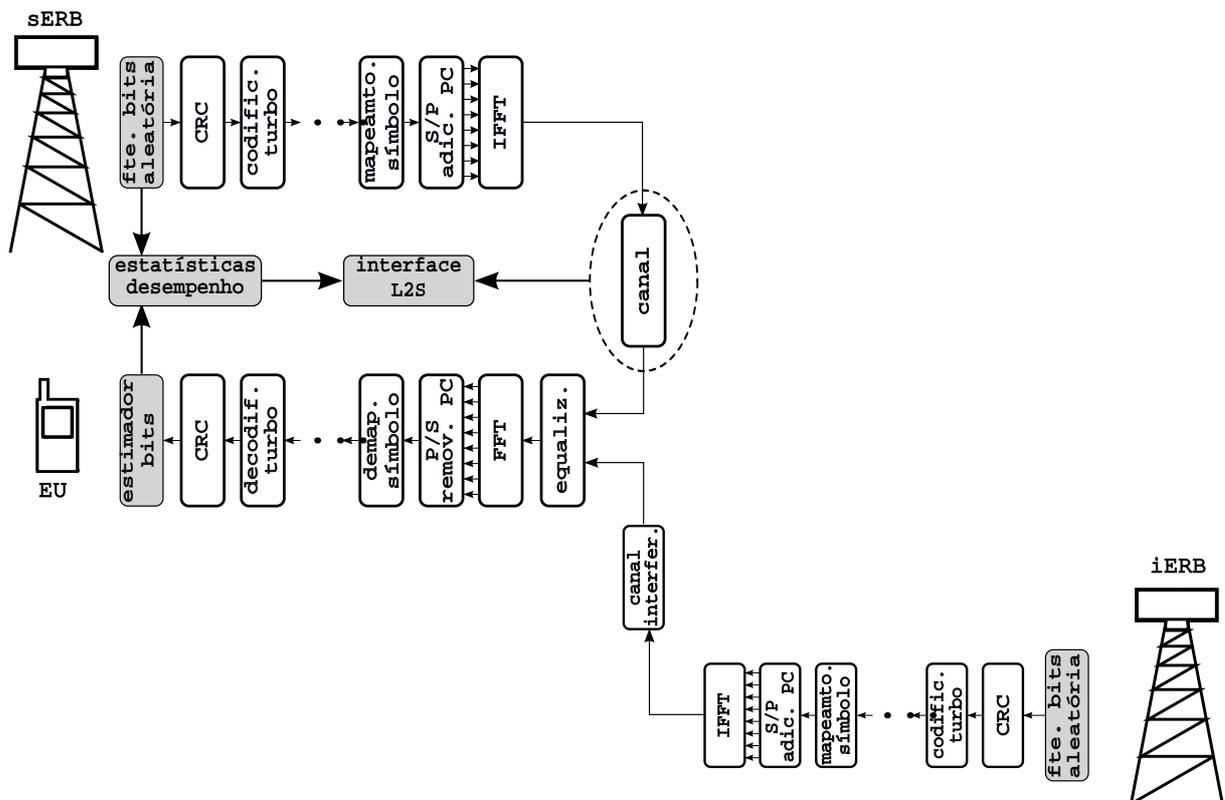


Figura 4.19: Cenário de simulação considerando um único EU sob a influência de duas ERBs dominantes independentes – uma sERB e uma iERB –, bem como os principais elementos das cadeias de transmissão e recepção.

Por simplicidade de análise, o EU dispõe de todas as $K = 256$ subportadoras, espaçadas de 15 kHz com alocação de potência igualitária entre elas. De modo a explorar a granularidade espectral, não se adotou a agregação de subportadoras em blocos (referidos como *physical resource block* (PRB) no LTE) como configuração padrão, mas tão somente permitiu-se essa opção.

O canal entre a sERB e o EU e o canal entre a iERB e o EU são independentes entre si, porém sujeitos aos mesmos parâmetros de configuração. O usuário desloca-se em movimento uniforme a uma velocidade de 30 km/h, referente tanto à sERB como à iERB, diante do modelo de canal veicular 'B' do *International Telecommunication Union* (ITU) [ITU 1997], cujo perfil atraso-potência – em termos do atraso relativo à primeira réplica versus a potência média relativa à réplica mais representativa – está reproduzido na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Perfil atraso-potência canal veicular 'B' do ITU [ITU 1997].

atraso relativo [ns]	potência média [dB]
0	-2,5
300	0,0
8.900	-12,8
12.900	-10,0
17.100	-25,2
20.000	-16,0

A cadeia de transmissão do EU compreende: CRC (do inglês, *cyclic redundancy check*) de 4 bits; $1/3$ de taxa de codificação turbo, cujos geradores de retroalimentação e direto são dados, nesta ordem, por 13 e 15 na base octal; mapeamento da modulação BPSK; e a transformada inversa rápida de Fourier sobre 256 elementos com período de guarda de 8 bits. Cada intervalo de transmissão dura 1 ms. Seguindo os mesmos moldes da cadeia de transmissão, a cadeia de recepção desempenha o processamento reverso, dentre outros tantos parâmetros, adotando-se demodulação suave com base na métrica *max-log* e oito iterações para a decodificação turbo¹¹, ao mesmo tempo em que combate os efeitos do canal rádio, i.e. desvanecimento do módulo e da rotação de fase.

Uma realização de canal compreende N intervalos de transmissão consecutivos, para cada um dos quais obtém-se o estado do ambiente $\hat{\gamma}(n)$ e o resultado da transmissão, em termos de sucesso ou falha. Essa mesma realização do canal é

¹¹Codificador e decodificador turbo utilizados provêm de implementação fornecida com a biblioteca IT++.

repetida 500 vezes¹², enquanto todas as demais sementes dos geradores aleatórios — concernentes a tráfego de dados e ruído térmico — são reiniciadas com outros valores, tal que a probabilidade de erro nas transmissões possa ser estimada em termos de BLEP: $p(n)$. Os pares $\langle \hat{y}(n), p(n) \rangle$ serão tomados como o conjunto de dados para construir as interfaces L2S. Note que o vetor $\hat{y}(n)$ em (4.20) contém informação suficiente também para obtenção da qualidade efetiva do canal segundo o modelo EESM (4.10).

Consideremos um cenário de condições adversas em que a proporção entre as potências P_s e P_i possa ser alterada, entretanto o mesmo valor médio de SINR é mantido constante e em patamares baixos o suficiente para caracterizar região de borda de célula. Uma certa configuração com valores médios fixos de P_s e P_i define um regime de operação, o qual é simulado com duração de 20.000 intervalos de transmissão. Três regimes de operação são definidos e empregados para as análises subsequentes. O primeiro regime, denominado potência interferente nula (PIN0), é caracterizado pela desativação da iERB. Os outros dois regimes ativam a iERB a diferentes níveis de potência interferente recebida: o nível mais baixo é referenciado por potência interferente de primeiro nível (PIN1) e o nível mais alto é referenciado por potência interferente de segundo nível (PIN2).

Os regimes podem ser configurados em termos de SNR média e de ι , onde $P_i = \iota P_s$. Três valores médios de SINR foram avaliados ao longo deste capítulo, conforme os parâmetros apresentados na Tabela 4.2. Notar que, à medida que se aumenta o nível da potência interferente, aumenta-se também a potência do sinal de modo a manter o mesmo valor de SINR.

Tabela 4.2: Configurações dos três regimes para diferentes valores médios de SINR avaliados.

configuração	regime	SNR média, dB	ι
$SINR = 0 \text{ dB}$	PIN0	0	0,000
	PIN1	3	0,495
	PIN2	40	1,000
$SINR = -3 \text{ dB}$	PIN0	-3	0,000
	PIN1	0	1,000
	PIN2	10	1,900
$SINR = -6 \text{ dB}$	PIN0	-6	0,000
	PIN1	0	3,000
	PIN2	6	3,725

¹²Extrapolando-se as deduções feitas em Jeruchim et al. (2000) em nível de bits, pode-se deduzir que a ferramenta de simulação LL aqui empregada fornecerá medidas confiáveis – diga-se ao menos 10 amostras de erro – para valores de BLEP acima de 2%.

Um último tipo de regime de operação, denominado regime misto, é constituído a partir concatenação dos regimes PIN0, PIN1 e PIN2. Portanto, uma simulação em regime misto dura 60.000 intervalos de transmissão.

4.5.2 Metodologia de Avaliação das Interfaces

Com base no mesmo conjunto de dados de um simulador de enlace, constroem-se os modelos a partir da abordagem EESM, CLA e MLP. Para cada um dos três primeiros regimes, os primeiros 10.000 instantes de tempo definem o subconjunto \mathcal{T}_c com os índices dos instantes usados para construção da interface; os 5.000 instantes seguintes definem o subconjunto \mathcal{V}_c com os índices de validação; e os últimos 5.000 instantes definem o subconjunto \mathcal{L}_c com os índices para teste.

No caso do regime misto, os subconjuntos de dados são concatenados, e assim os subconjuntos com os índices dos instantes usados para construção, validação e teste das interfaces L2S, são dados, respectivamente, por $\mathcal{T} = \bigcup_{c=1}^3 \mathcal{T}_c$, $\mathcal{V} = \bigcup_{c=1}^3 \mathcal{V}_c$ e $\mathcal{L} = \bigcup_{c=1}^3 \mathcal{L}_c$, como ilustrado na Figura 4.20.

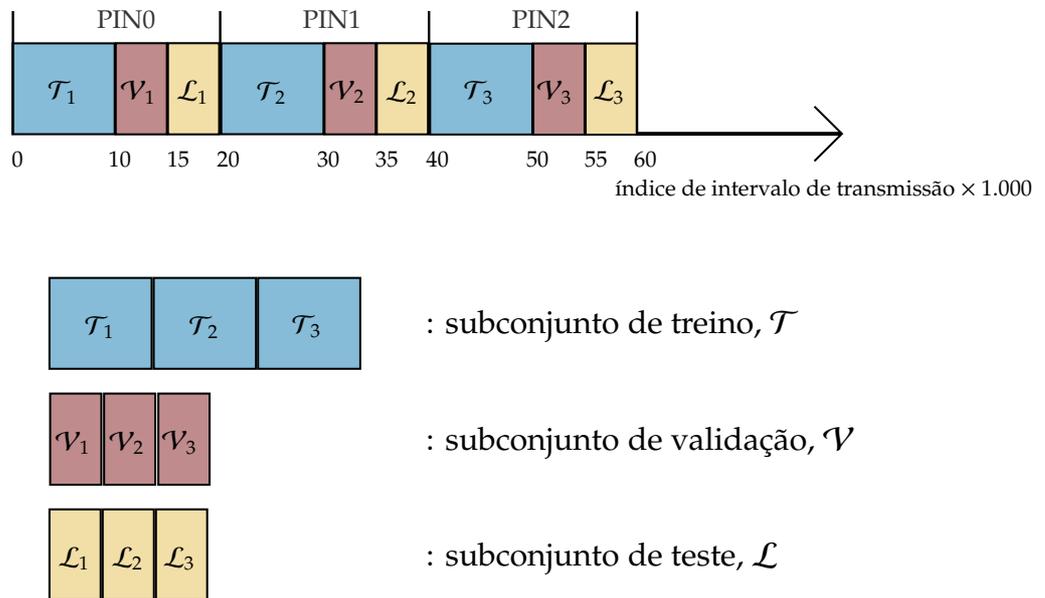


Figura 4.20: Organização dos índices referentes aos instantes de tempo em subconjuntos de construção, validação e teste das interfaces L2S EESM e nL2Si em regime misto.

4.5.3 Resultados

Ao longo desta seção, avalia-se a predição de desempenho do enlace obtida por meio dos diferentes tipos de interface L2S. A rigor, a eficácia do preditor pode ser notada visualmente, entretanto, algumas métricas de apoio serão consideradas. São elas: erro quadrático médio (EQM), erro absoluto – média harmônica (EAMH) e correlação *CorrCoef*. Essas métricas são calculadas após finalizado o teste de predição, levando-se em conta as N amostras do teste. Assim, as expressões consideradas para cada uma dessas métricas são:

$$EQM = \frac{1}{2N} \sum_n^N |p(n) - o(n)|^2; \quad (4.36)$$

$$EAMH = 1 - \left(\frac{\sum_n^N \frac{1}{1 - |p(n) - o(n)|}}{N} \right)^{-1}; \quad (4.37)$$

$$CorrCoef = \frac{\sum_n^N (p(n) - \frac{1}{N} \sum_n^N p(n)) (o(n) - \frac{1}{N} \sum_n^N o(n))}{\sqrt{\sum_n^N (p(n) - \frac{1}{N} \sum_n^N p(n))^2 \sum_n^N (o(n) - \frac{1}{N} \sum_n^N o(n))^2}}. \quad (4.38)$$

Diferentemente da métrica EQM, a métrica EAMH realça grandes erros absolutos entre $p(n)$ e $o(n)$. Por exemplo, se o valor alvo é $p(n) = 1$, mas o valor predito for $o(n) = 0$, ou vice-versa, trata-se do máximo erro absoluto de predição; $EAMH = 1$ mesmo que esse erro absoluto tenha ocorrido uma única vez. Já, a métrica *CorrCoef* pode ser útil para avaliar o comportamento da série de valores preditos $o(n)$ com relação àqueles apresentados, $p(n)$, para $n = 1, 2, \dots, N$, sendo representada por um coeficiente com valor real indo de -1 (anti-correlação) a +1 (correlação perfeita); a descorrelação completa é acusada por $CorrCoef = 0$.

O primeiro cenário avaliado refere-se àquele com SINR média de 0 dB, considerando individualmente os regimes PIN0, PIN1 e PIN2. Na Figura 4.21 observa-se o comportamento da BLEP em cada um desses três regimes. É notória a diferença de comportamento entre os três regimes, principalmente se comparados o regime PIN0 ao PIN2. Essa diferença é devida à maneira que a recepção é afetada pelo ruído térmico e pela interferência. A SNR é preponderante para o desempenho do receptor. Além disso, a variável aleatória de ruído térmico é uniformemente distribuída por toda a largura de banda, bem como a relação entre potência de sinal e de interferência varia na frequência conforme o desvanecimento dos canais entre cada uma das ERBs e o EU.

A parcela dos dados relativa ao treinamento é igualmente considerada pelas diferentes interfaces L2S para construção de um modelo. Primeiramente a interface EESM foi implementada adotando-se diferentes graus de polinômio para realizar o mapeamento da qualidade. Para cada um desses casos, a calibração se deu a partir da observação do EQM do conjunto de treino em função do valor de β , conforme ilustrado na Figura 4.22. Os valores de β que levaram ao menor EQM foram considerados para a obtenção das curvas artificiais. Essas curvas artificiais, juntamente do gráfico de dispersão constituído pelos pontos $\langle SINR_{eff}, BLEP \rangle$ obtidos do conjunto de treino, são ilustradas na Figura 4.23. Na Figura 4.24 são apresentados os resultados de predição obtidos através da interface EESM com polinômio grau 4 devidamente calibrada. Atendo-se, no momento, a uma análise visual, portanto, qualitativa, pode-se dizer que a interface EESM foi capaz de prover uma predição de maneira satisfatória.

A interface nL2Si baseada no CLA foi construída com o mesmo conjunto de treinamento usado pela interface EESM. Na Figura 4.25 são apresentados os resultados de predição obtidos através do CLA devidamente treinado. É notório como o desempenho do CLA ficou aquém do EESM neste caso.

De maneira similar, treinou-se também a interface nL2Si baseada no MLP com uma única camada oculta, constituída por 20 neurônios artificiais. Na Figura 4.26 são apresentados os resultados de predição obtidos através da rede MLP devidamente treinada. Em relação ao desempenho do CLA, observou-se uma significativa melhoria; em relação à EESM, torna-se necessário recorrer à análise das métricas de apoio disponíveis. A Tabela 4.3 organiza os valores obtidos para as métricas de desempenho para as três interfaces L2S testadas. Para os regimes PIN0 e PIN1, a interface EESM mostrou-se superior no tocante às três métricas consideradas, i.e. apresenta os menores valores para EQM e EAMH e maior valor de *CorrCoef*; a nL2Si-CLA apresentou o pior desempenho; e a nL2Si-MLP apresentou o desempenho intermediário, entretanto, mais próximo do desempenho da EESM. Para o regime PIN2, as três abordagens foram malsucedidas em predizer a série de valores de BLEP, ao mesmo tempo que mantiveram os mais baixos patamares de EQM e EAMH. De fato, a faixa dinâmica da BLEP alvo é muito estreita e todas as interfaces, apesar de não reproduzirem esse comportamento com a mesma eficiência observada nos outros regimes, forneceram uma resposta quase constante próxima ao centro dessa faixa dinâmica. Assim, o erro absoluto capturado foi satisfatório em termos de EQM e EAMH, mas o comportamento da série de valores preditos de BLEP não o foi, conforme evidenciado pelos baixos valores de *CorrCoef*, inclusive sendo obtido um valor negativo de *CorrCoef* na predição realizada pelo CLA.

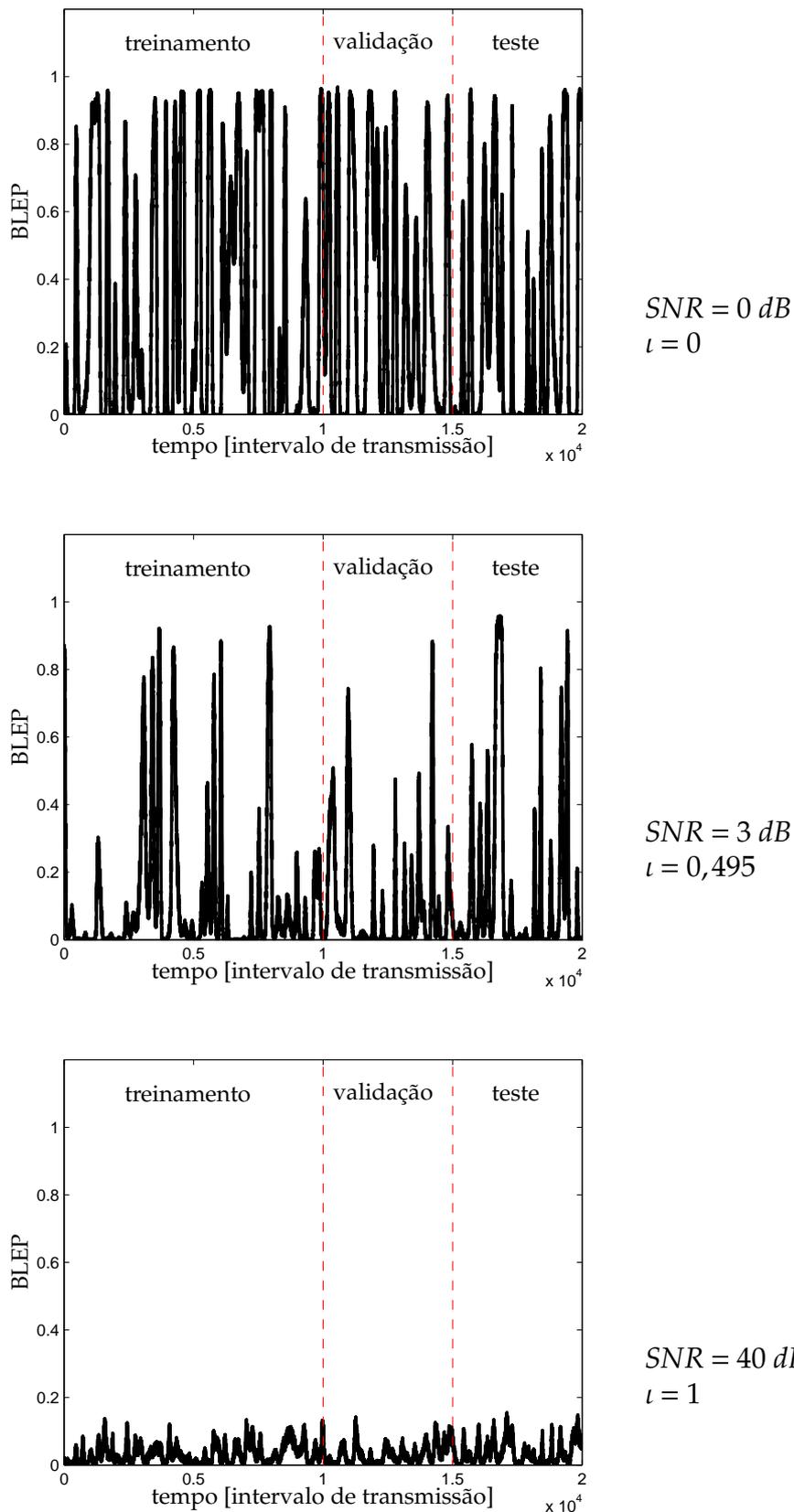


Figura 4.21: Séries dos valores de BLEP para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0$ dB.

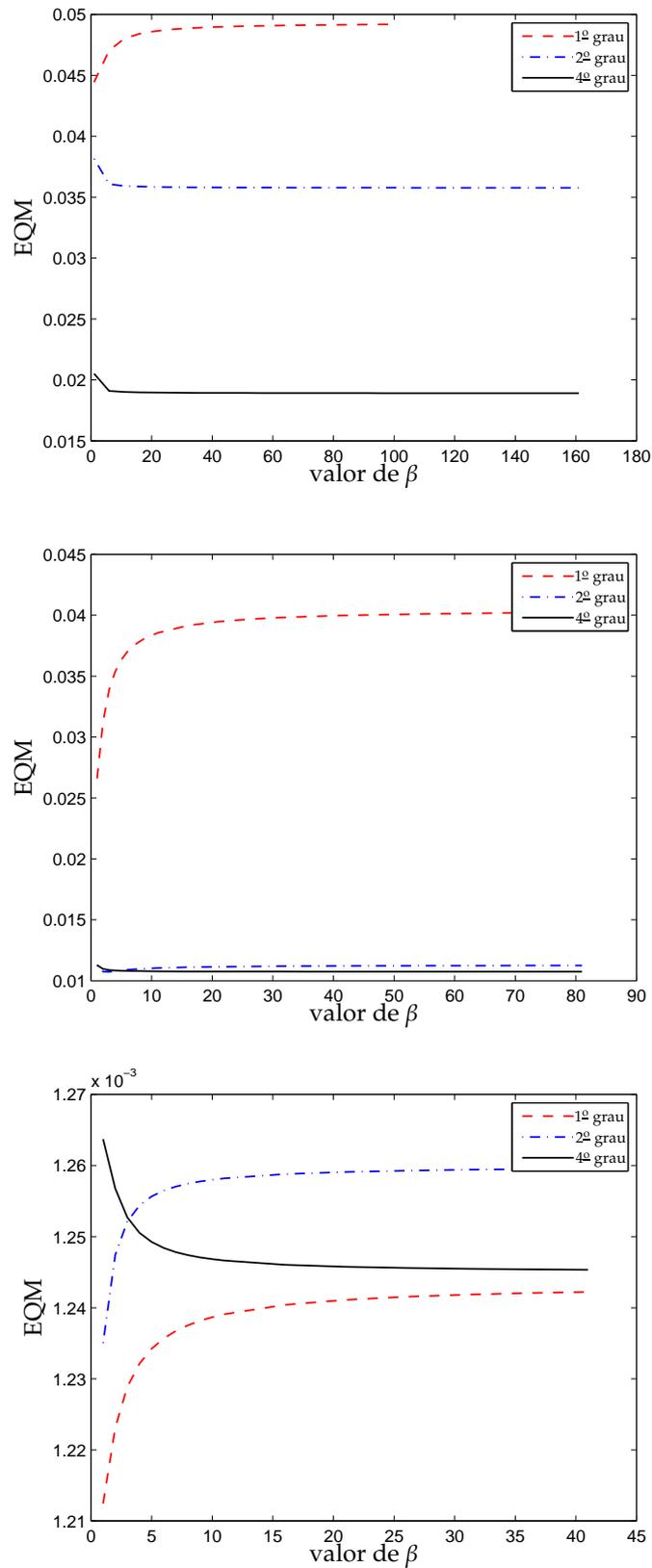


Figura 4.22: EQM em função do valor de β para calibração da interface EESM individualmente para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0$ dB.

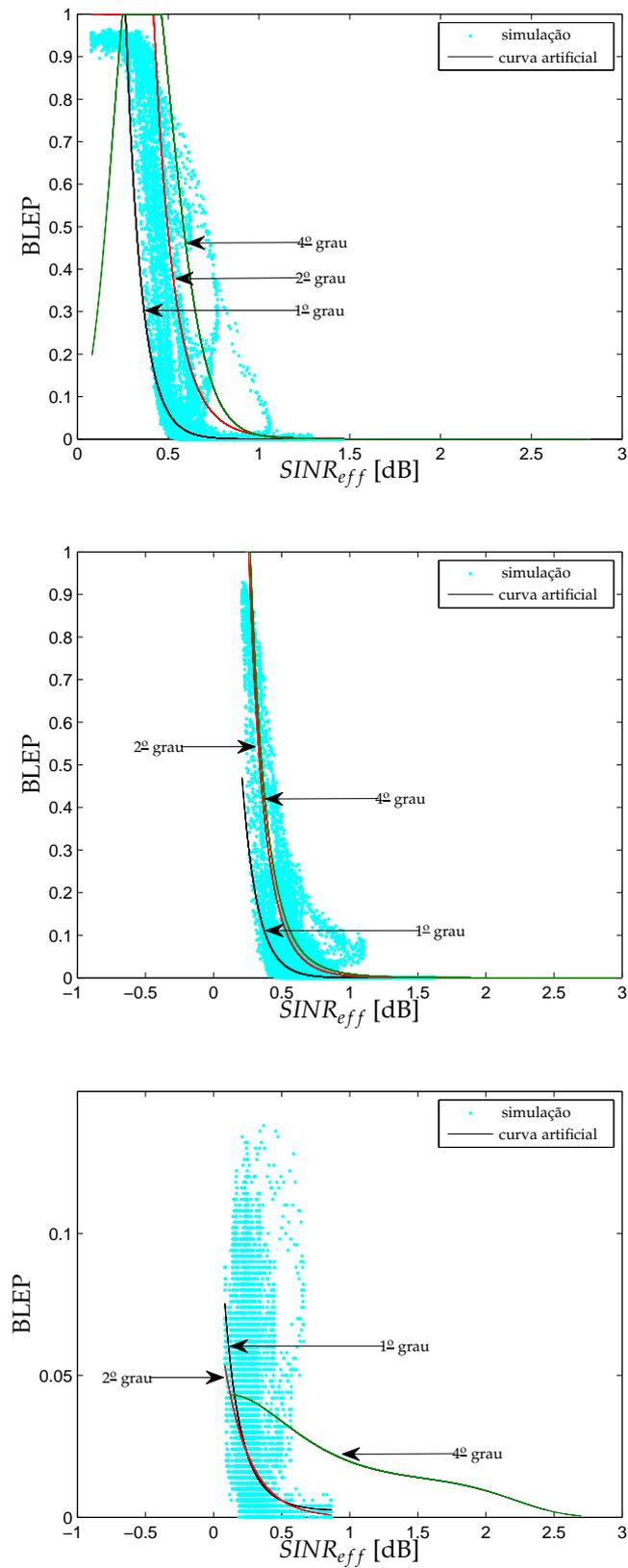


Figura 4.23: Gráficos de dispersão e curvas artificiais obtidas para a interface EESM com os valores ótimos de β individualmente para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0$ dB.

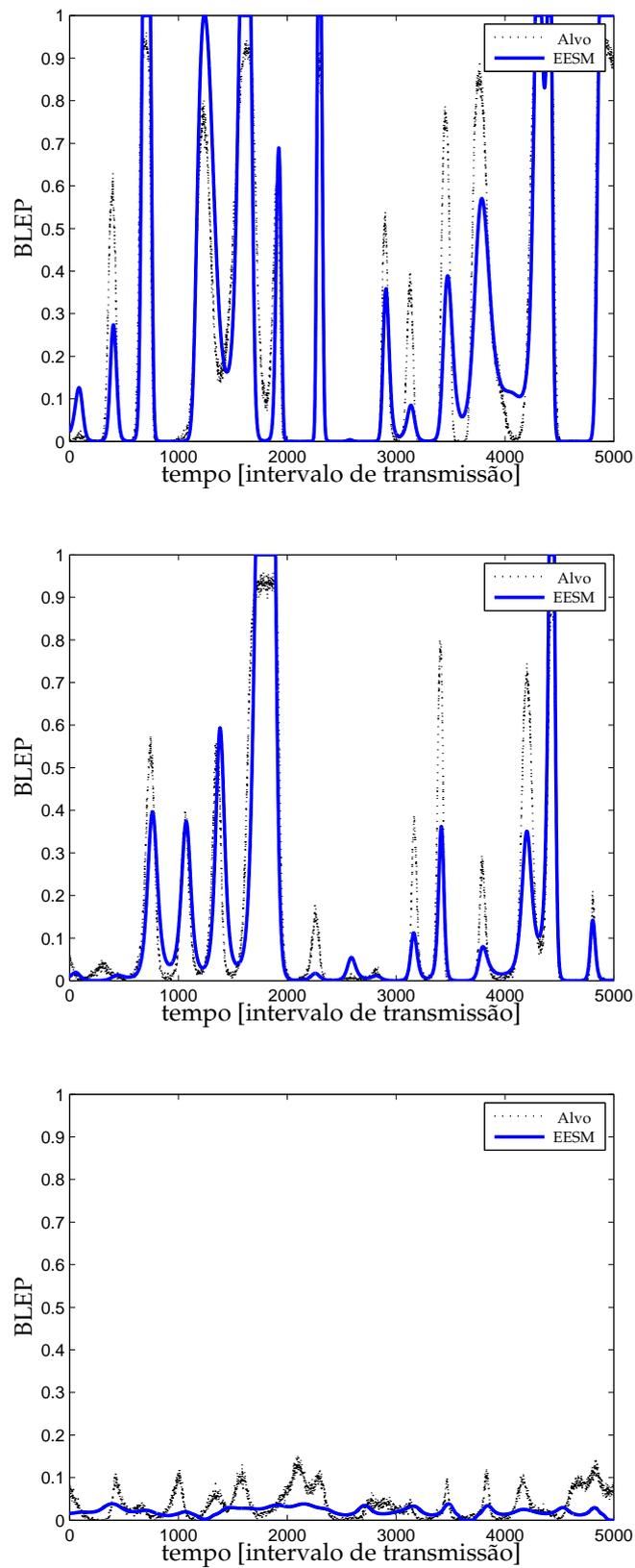


Figura 4.24: Resultados de predição obtidos através da interface L2S EESM, dos valores de BLEP para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0 \text{ dB}$.

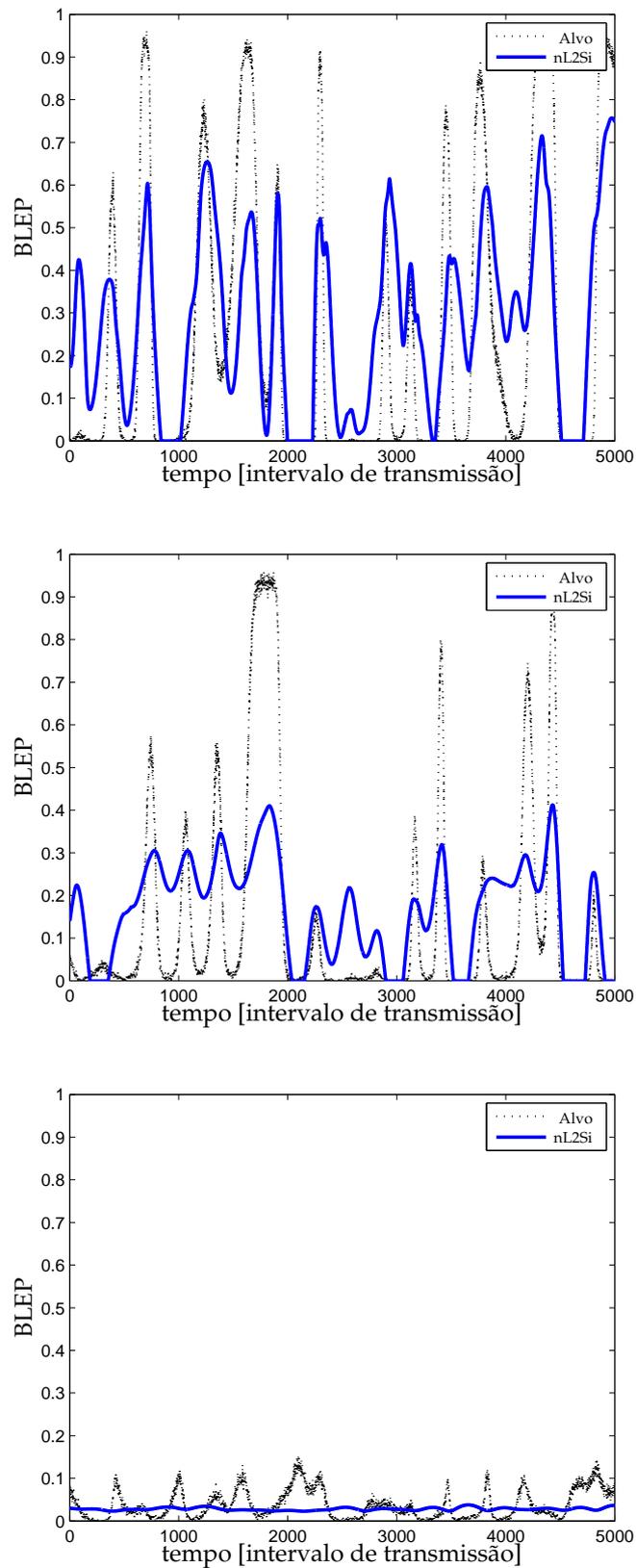


Figura 4.25: Resultados de predição obtidos através da interface nL2Si baseada no CLA, dos valores de BLEP para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0$ dB.

Tabela 4.3: Métricas de desempenho para as interfaces L2S testadas – EESM, nL2Si-CLA e nL2Si-MLP – individualmente para os regimes PIN0, PIN1 e PIN2 a um valor médio de $SINR = 0$ dB.

regime	L2S	EQM	EAMH	CorrCoef
PIN0	EESM	0,009454	0,10070	0,91539
	CLA	0,025789	0,20482	0,73561
	MLP	0,012948	0,13811	0,89182
PIN1	EESM	0,005376	0,06567	0,91425
	CLA	0,018647	0,16864	0,68685
	MLP	0,008503	0,10269	0,86859
PIN2	EESM	0,000623	0,02602	0,32140
	CLA	0,000631	0,02782	-0,28265
	MLP	0,000547	0,02673	0,31009

Testes similares foram conduzidos também para um valor médio de $SINR = -3$ dB. Na Figura 4.27 pode-se observar o comportamento da BLEP nos regimes de operação PIN0, PIN1 e PIN2. A Tabela 4.4 concentra os resultados obtidos para as métricas de desempenho EQM, EAMH e *CorrCoef*. Trata-se de um cenário mais severo, apontando uma degradação de desempenho para todas as métricas e interfaces, em termos gerais. A relação entre as interfaces também se alterou, sendo agora a nL2Si-MLP a interface que apresenta o melhor desempenho nos regimes PIN0 e PIN1, seguida pela CLA e, por último, está posicionada a interface EESM. Novamente, os resultados mediante o regime PIN2 foram insuficientes para a comparação das interfaces, dada a estreita faixa dinâmica dos valores de BLEP. Entretanto, se comparada ao cenário anterior, essa faixa dinâmica é mais ampla e a correlação melhor para as três interfaces. Para o regime PIN0, a interface EESM apresentou EAMH unitária, indicando a ocorrência de ao menos um erro absoluto máximo; analisando toda a resposta foram detectadas 138 ocorrências de erro absoluto máximo.

Na Tabela 4.5, apresentam-se novamente os resultados de desempenho para a rede MLP com uma única camada oculta, em termos de EQM, EAMH e *CorrCoef*, entretanto, desta vez avalia-se a influência do número de entradas levadas em conta tanto no treinamento quanto no teste. Em contraste ao uso de todas as 256 subportadoras como entrada, tanto para \hat{y} como para \check{y} , experimentou-se também o descarte de algumas subportadoras, de maneira similar, porém mais simples, ao que Oborina & Moisis (2007) estudaram para a interface ESM, os quais se embasaram no período e na largura de banda de coerência do canal. Para um conjunto de \check{K} subportadoras adjacentes, toma-se apenas a medida de uma subportadora central. Foram avaliados os conjuntos de subportadoras com tamanho 12, com vistas ao PRB adotado no LTE, e também

Tabela 4.4: Métricas de desempenho para as interfaces L2S testadas – EESM, nL2Si-CLA e nL2Si-MLP – individualmente para os regimes PIN0, PIN1 e PIN2 a um valor médio de $SINR = -3$ dB.

regime	L2S	EQM	EAMH	CorrCoef
PIN0	EESM	0,037018	1,00000	0,75828
	CLA	0,025593	0,20910	0,79570
	MLP	0,014467	0,14691	0,88938
PIN1	EESM	0,016153	0,15343	0,88567
	CLA	0,014190	0,15194	0,86414
	MLP	0,013253	0,14552	0,87573
PIN2	EESM	0,004006	0,07389	0,64187
	CLA	0,005558	0,09062	0,65743
	MLP	0,004502	0,08342	0,69020

Tabela 4.5: Métricas de desempenho para as interfaces nL2Si-MLP – considerando todas as subportadoras como entrada, uma a cada 12 e uma a cada 64 – testada individualmente para os regimes PIN0, PIN1 e PIN2 a um valor médio de $SINR = -3$ dB.

regime	subportadoras	EQM	EAMH	CorrCoef
PIN0	todas	0,014467	0,14691	0,88938
	1 / 12	0,015543	0,14735	0,87552
	1 / 64	0,039570	0,24627	0,71575
PIN1	todas	0,013253	0,14552	0,87573
	1 / 12	0,014196	0,14483	0,86933
	1 / 64	0,016644	0,15861	0,83536
PIN2	todas	0,0045022	0,083418	0,69020
	1 / 12	0,0047192	0,081370	0,69028
	1 / 64	0,0050849	0,088524	0,60152

tamanho 64. É notório como a predição fica prejudicada com a redução do número de entradas, sobretudo, quando estão muito espaçadas na frequência. No entanto, para um conjunto de 12 subportadoras, a degradação foi sutil.

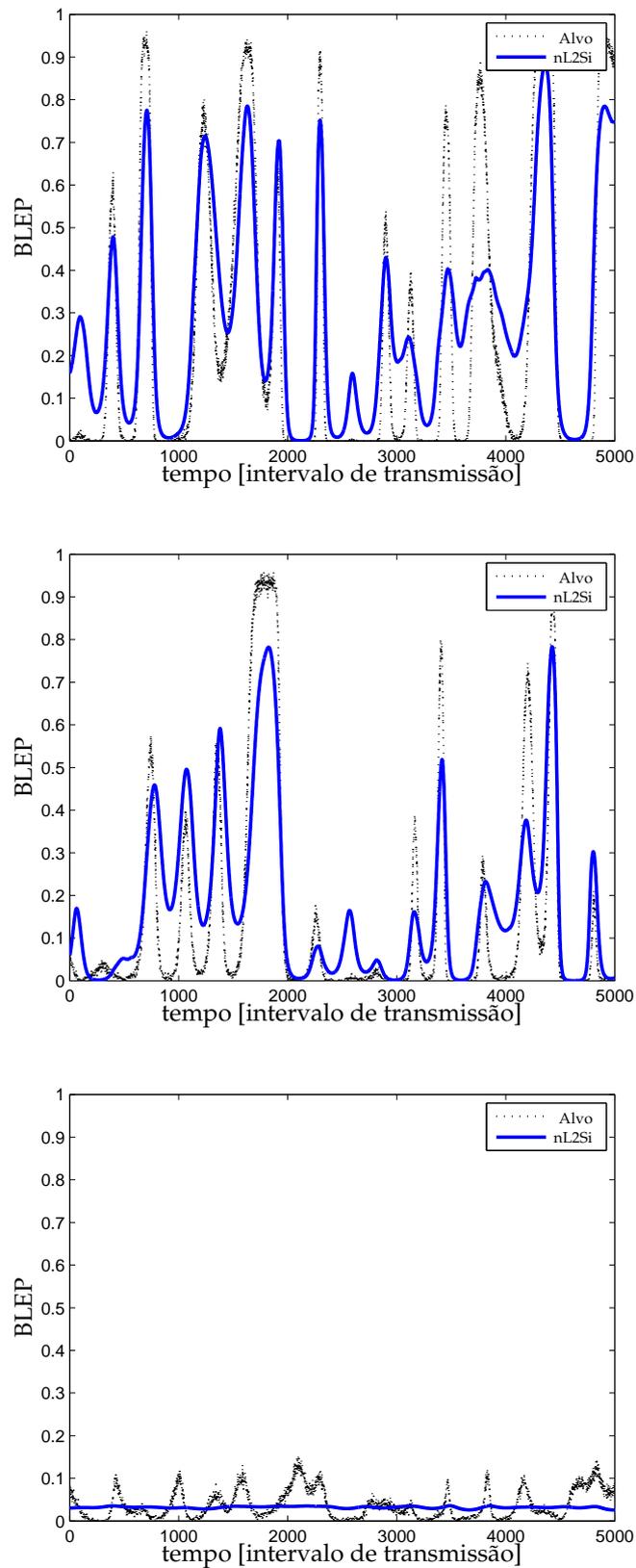


Figura 4.26: Resultados de predição obtidos através da interface nL2Si baseada na rede MLP, dos valores de BLEP para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = 0$ dB.

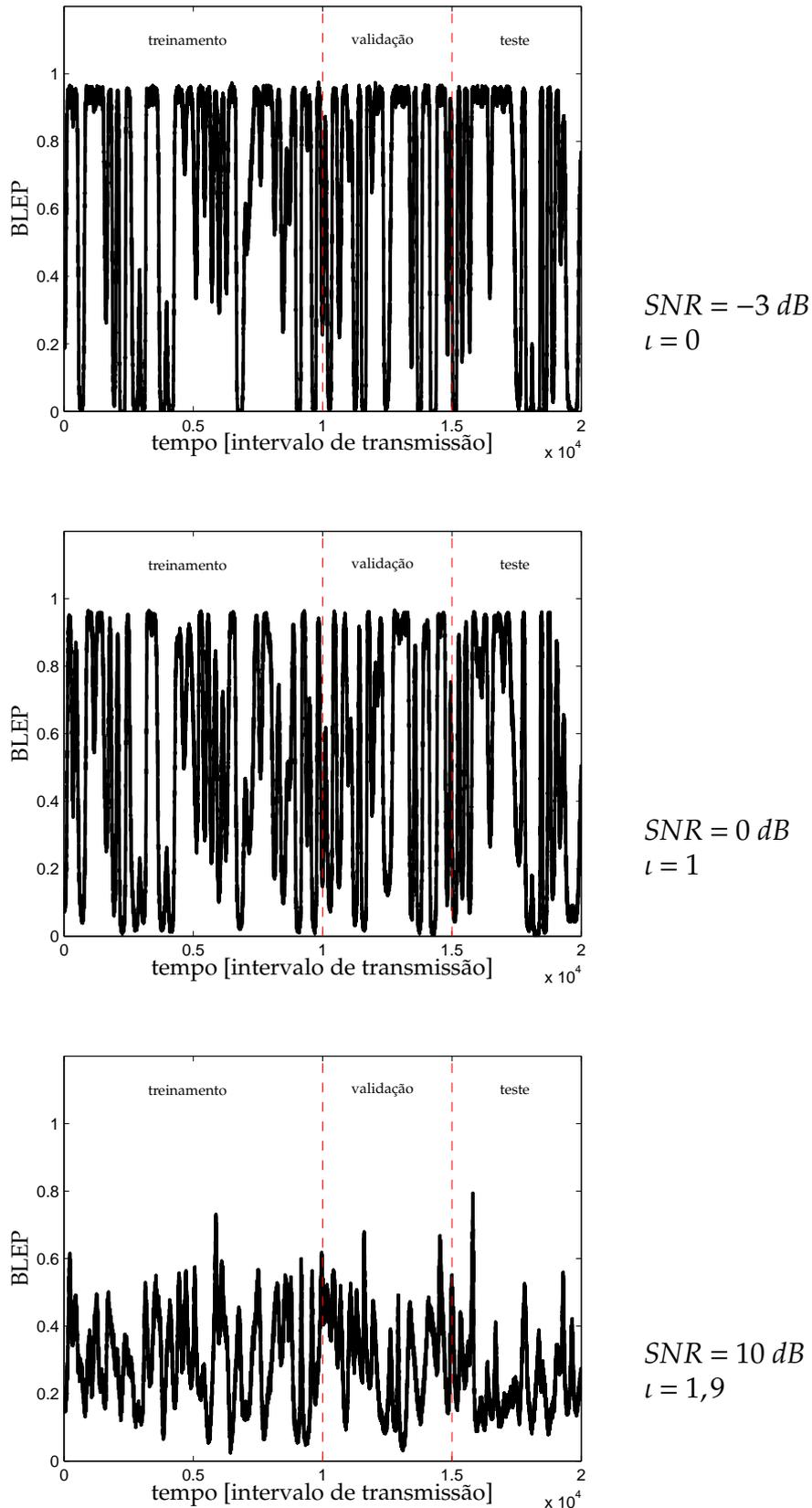


Figura 4.27: Séries dos valores de BLEP para os regimes (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = -3 \text{ dB}$.

Os próximos resultados se referem ao regime misto de operação a um valor médio de $SINR = -3 \text{ dB}$. Na Figura 4.28, observa-se o comportamento da BLEP nesse regime.

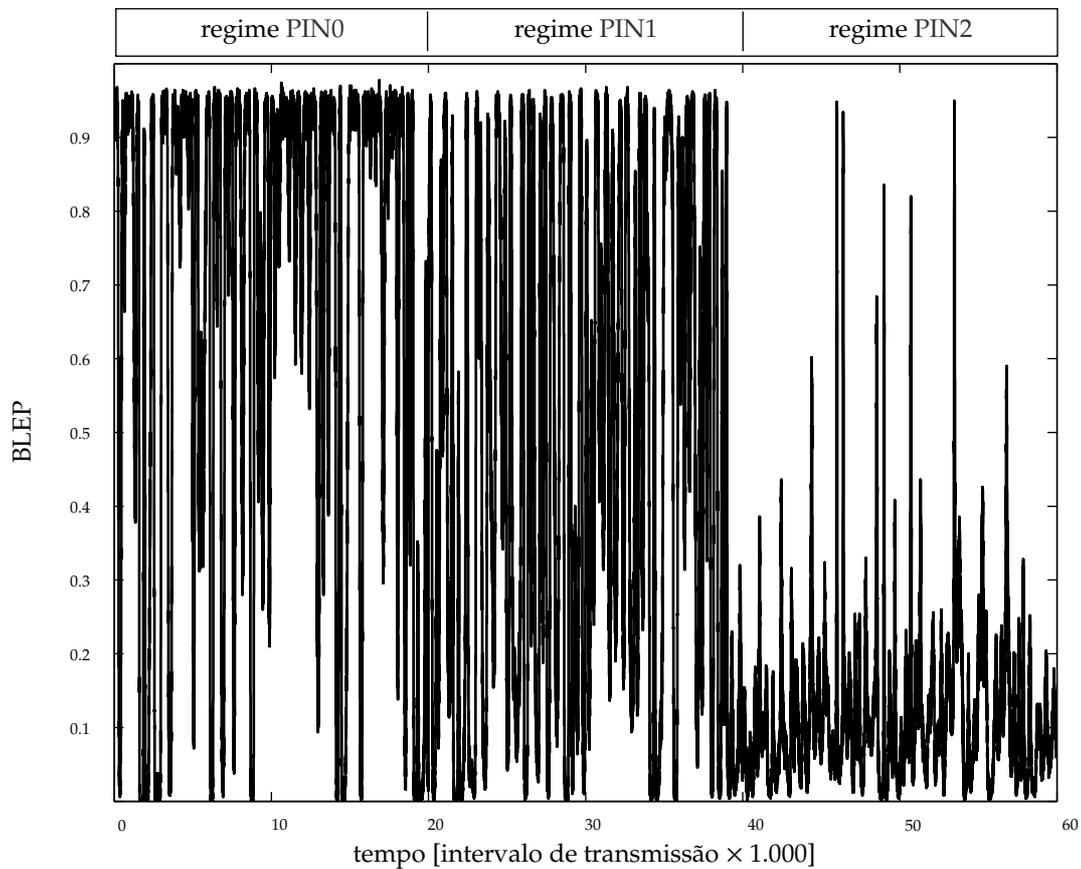


Figura 4.28: Valores de BLEP obtidos de extensas simulações de enlace em regime misto.

Na Figura 4.29 apresentam-se as curvas artificiais obtidas para o EESM com polinômios de 1º, 2º, 4º e 6º graus, após a devida calibração dos valores de β ; notar que tão somente o polinômio de 1º grau respeita a monotonicidade esperada para a curva. Na Figura 4.30 pode-se observar o comportamento da curva de aprendizagem para a interface nL2Si, tanto baseada no CLA como na rede MLP, esta, por sua vez, avaliada com uma e duas camadas ocultas.

Os resultados de predição estão concentrados na Figura 4.31 e Figura 4.32, para EESM e nL2Si, respectivamente. Com base nesses gráficos, percebe-se que a predição proporcionada pela EESM não acompanha as mudanças ocorridas no regime de operação, ao passo que a predição proporcionada pela nL2Si o faz. Entretanto, diferentemente da nL2Si-MLP, a nL2Si-CLA não apresenta exatidão satisfatória. Note que a EESM apresenta resposta um tanto quanto similar independente de estar diante

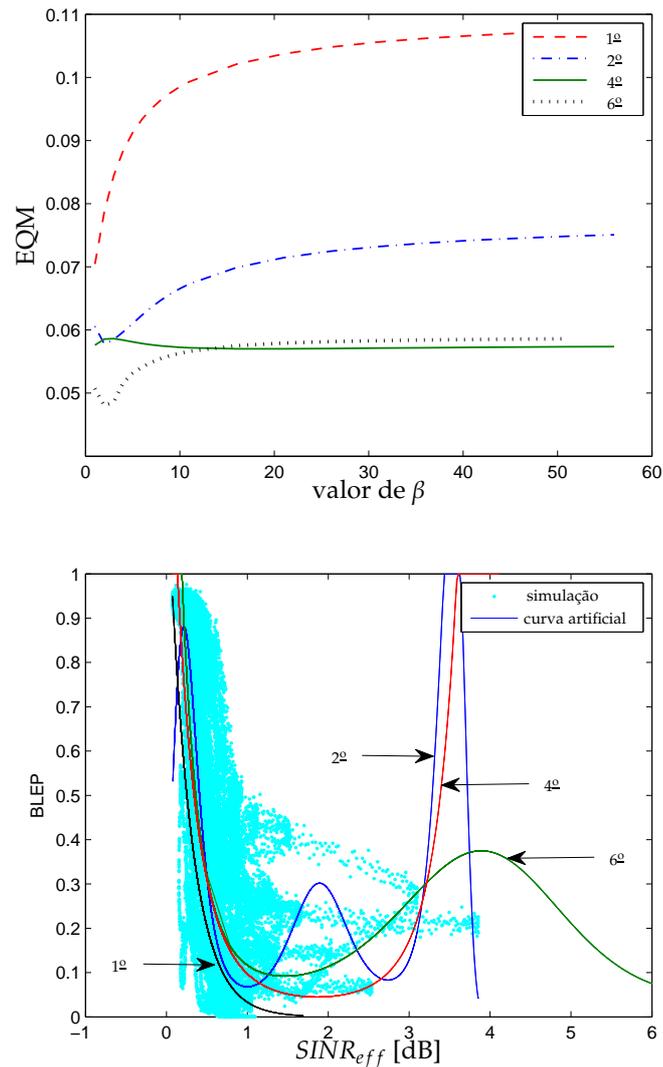


Figura 4.29: (Topo) EQM em função do valor de β para calibração da interface EESM e (abaixo) curvas artificiais obtidas para o melhor ajuste de β em cada um dos graus para o regime de operação misto com $SINR = -3$ dB.

do regime de operação PIN0, PIN1 ou PIN2, mas a nL2Si comporta-se distintamente para cada um desses três regimes, similar ao comportamento da BLEP alvo. O gráfico de dispersão da Figura 4.29 pode ser decomposto em três porções, cada uma referente a um dos três regimes, tal como ilustrado na Figura 4.33. Torna-se perceptível a semelhança na faixa de valores de $SINR_{eff}$ entre esses regimes. Desse modo, uma única curva artificial não será eficiente em predizer de maneira distinta o comportamento em cada um desses três regimes.

Tais constatações podem ser averiguadas através da Tabela 4.6, a qual concentra os resultados obtidos para as métricas de desempenho EQM, EAMH e *CorrCoef*. A interface EESM apresenta os menores valores de EQM e EAMH e os maiores de

Tabela 4.6: Métricas de desempenho para as interfaces L2S testadas – EESM, nL2Si-CLA e nL2Si-MLP, em suas várias versões – para o regime misto de operação a um valor médio de $SINR = -3$ dB.

L2S	versão	EQM	EAMH	CorrCoef	OFG
EESM	pol. grau 1	0,068418	0,24705	0,71341	2462
	pol. grau 4	0,057032	0,22457	0,73979	1685
	pol. grau 6	0,047835	0,20129	0,78336	1324
CLA	única	0,048021	0,30302	0,42968	3067
MLP com 1 camada oculta	2 Nh	0,017545	0,16405	0,84723	801
	5 Nh	0,015069	0,14878	0,85995	526
	10 Nh	0,013665	0,14417	0,87376	369
	20 Nh	0,015625	0,15926	0,86022	317
	50 Nh	0,016586	0,16506	0,85062	371
MLP com 2 camadas ocultas	2 Nh	0,014638	0,14513	0,86840	637
	5 Nh	0,012626	0,13276	0,88357	559
	10 Nh	0,013278	0,14169	0,87762	327
	20 Nh	0,014273	0,14711	0,86706	505
	50 Nh	0,016853	0,17076	0,84012	767

CorrCoef à medida que se aumenta o grau do polinômio. Porém, esse aumento deve ser realizado de maneira cautelosa, visto que a generalização (extrapolação) pode ficar seriamente prejudicada para pontos de teste que porventura venham a estar demasiadamente afastados da massa de pontos de treino. A nL2Si-CLA apresentou os piores desempenhos em termos das métricas avaliadas. Por último, a nL2Si-MLP apresentou os melhores desempenhos mesmo para o caso de uma única camada oculta constituída de $Nh = 2$ neurônios, levando os valores de EQM, de EAMH e de *CorrCoef* a patamares não alcançados pela melhor EESM. Aumentando-se o número de neurônios Nh na camada oculta, obtêm-se melhores valores para essas três métricas, entretanto, a dificuldade de se ajustarem os parâmetros livres da rede, assegurando a melhor capacidade de generalização possível, também aumenta. Essa dificuldade está evidenciada pela leve degradação observada a partir de $Nh = 20$. Uma melhoria no desempenho também pode ser observada quando se insere uma segunda camada oculta, entretanto, ainda permanece a dificuldade de se melhorar o desempenho juntamente com o aumento do número de neurônios das camadas ocultas.

As métricas EQM, EAMH e *CorrCoef* têm sido satisfatórias para as análises até aqui conduzidas em termos de exatidão das respostas das interfaces, entretanto não são diretamente relacionadas ao impacto em nível sistêmico. De fato, a média operada sobre os erros quadráticos implica a perda da informação se a resposta da interface L2S se caracteriza por poucos erros significativos ou por uma imensidão de erros

insignificantes. Neste contexto, notoriamente os cenários com erros insignificantes, mesmo que sejam muitos, implicarão um melhor desempenho para o sistema. Na Figura 4.34 mostra-se a função distribuição cumulativa dos valores absolutos dos erros de predição causados por ambas nL2Si-MLP e EESM. Nota-se que os valores absolutos dos erros de predição da nL2Si-MLP são, em geral, menores que os da EESM. A mediana, por exemplo, é 0,09 e 0,21, respectivamente, para nL2Si e EESM.

A significância do erro refere-se a seu potencial em causar falhas em mecanismos das camadas superiores. Enquanto erros insignificantes podem levar a falhas leves nesses mecanismos, erros significativos muito provavelmente levarão a falhas graves. Cada um dos erros insignificantes não é suficiente para desviar substancialmente decisões nas simulações sistêmicas – tais como adaptação de enlace e mecanismo de gerenciamento de recursos –, mas pode ser que um erro significativo o seja. Por esse motivo, propõe-se aqui uma nova métrica capaz de inferir esse grau de nocividade. Primeiramente estabelece-se um limiar para classificar os erros entre insignificantes ou não, de acordo com a gravidade da falha que ele pode provocar. Por exemplo, pode-se estabelecer como limiar um desvio da 40% em relação ao valor verdadeiro da BLEP, de modo que erros iguais ou superiores a 0,4 são computados como falhas graves, enquanto que erros inferiores a 0,4 são computados como falhas leves. Desse modo, define-se uma nova métrica para desempenho das interfaces denominada ocorrência de falhas graves (OFG), a qual já foi contemplada na Tabela 4.6, em sua última coluna. A superioridade da nL2Si-MLP frente à EESM e à nL2Si é corroborada através dessa nova métrica. Ao longo da simulação do EESM com polinômio de 6º grau, capturaram-se 1.324 falhas graves, ao passo que para a nL2Si-MLP com uma camada oculta com 10 neurônios, foram capturadas apenas 369 falhas graves. Por um momento, consideremos também um cenário muito similar ao anterior, porém com valor médio de SINR de -6 dB diante de regime misto composto da concatenação de PIN0, PIN1 e PIN2 caracterizados na Tabela 4.2. Notar que facilmente pode-se estabelecer outros valores de limiar da OFG, podendo alternativamente ser representada no gráfico da Figura 4.34 como um reta vertical.

Para cada um dos cenários (viz. $SINR = -3$ dB e $SINR = -6$ dB) conduziram-se quatro campanhas de simulação com independentes realizações dos canais, confrontando EESM e nL2Si-MLP com duas camadas ocultas, para os melhores grau polinomial e número de neurônios por camada oculta avaliados. Os montantes de ocorrência de falhas graves estão organizados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Número de ocorrência de falhas graves para diferentes campanhas de simulação de dois cenários principais, em que 0,4 é o limiar de classificação das falhas.

índice da campanha	SINR = -3 dB		SINR = -6 dB	
	nL2Si-MLP	EESM	nL2Si-MLP	EESM
1	327	1.324	244	525
2	357	1.800	391	1.091
3	596	1.731	724	1.365
4	569	1.804	185	1.324

A razão entre os montantes de ocorrência de falhas graves da EESM e da nL2Si-MLP varia significativamente ao longo das diferentes campanhas de simulação. Nessas simulações, o valor observado para essa razão variou de 1,89 a 7,16, sempre a nL2Si-MLP mostrando-se a opção mais apropriada de interface L2S.

Novamente, para um valor médio de SINR de -3 dB, o histograma dos erros quadráticos é disposto na Figura 4.35 em intervalos, da falha mais leve — erro quadrático no intervalo $[0,0;0,1]$ — até a mais grave — erro quadrático no intervalo $]0,9;1,0]$ —, juntamente com o intervalo de confiança em nível de 90%. Considere que sejam tomados os valores médios de erros quadráticos dentro de cada intervalo. A nL2Si-MLP apresentou um número 20,6% maior de ocorrências da falha mais leve. Por outro lado, nL2Si-MLP apresentou menos falhas que a EESM nos demais intervalos, reduzindo as ocorrências em 57,3%, 54,5%, 87,4%, 88,4%, 93,4%, 91,1% e 76,9%, para os intervalos $]0,1;0,2]$, $]0,2;0,3]$, $]0,3;0,4]$, $]0,4;0,5]$, $]0,5;0,6]$, $]0,6;0,7]$, $]0,7;0,8]$, na mesma ordem. Assim, a nL2Si-MLP mostrou-se ser mais confiável que a EESM, especialmente para os mais altos valores de erros quadráticos de predição, justamente aqueles que tendem a ser mais danosos às ferramentas SL.

4.6 Considerações Finais

Neste capítulo, discutiu-se especial desvantagem da interface enlace-a-sistema (L2S) baseada no modelo *exponential ESM* (EESM), no tocante à inabilidade de discernir as participações de ruído térmico e da interferência na resposta do enlace. Deu-se enfoque à região de borda de célula de um sistema baseado na tecnologia *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM). Baseada no conceito de rede neural artificial (RNA), uma nova abordagem foi introduzida para realização da interface L2S, denominada *neural link-to-system interface* (nL2Si), a qual mostrou-se ser apta a superar as limitações impostas às interfaces baseadas no EESM. Através de simulações

computacionais, avaliaram-se as interfaces L2S sob diferentes regimes, cada um dos quais caracterizado por configuração diferente de potência de sinal e de potência interferente. A interface EESM ainda mostrou-se adequada diante de $SINR = 0$ dB. Quando a *signal-to-interference plus noise ratio* (SINR) foi reduzida para -3 dB, a interface nL2Si-multilayer perceptron (MLP) despontou-se com os melhores resultados, sobretudo para os regimes potência interferente nula (PIN0) e potência interferente de primeiro nível (PIN1). A superioridade da nL2Si-MLP ficou mais evidente ao se transitar entre os diferentes regimes de mesma SINR média, como avaliado através do regime misto. Esses resultados sugerem que a nL2Si consiste em uma abordagem promissora, proporcionando expressiva diminuição do número de ocorrências de falhas graves. Portanto, através da nL2Si, acredita-se que as ferramentas *system-level* (SL) tendem a ser menos susceptíveis a decisões danosas no governo dos mecanismos de gerenciamento de recursos de rádio e adaptação de enlace, e, por consequência, menos prováveis em subestimar o desempenho sistêmico.

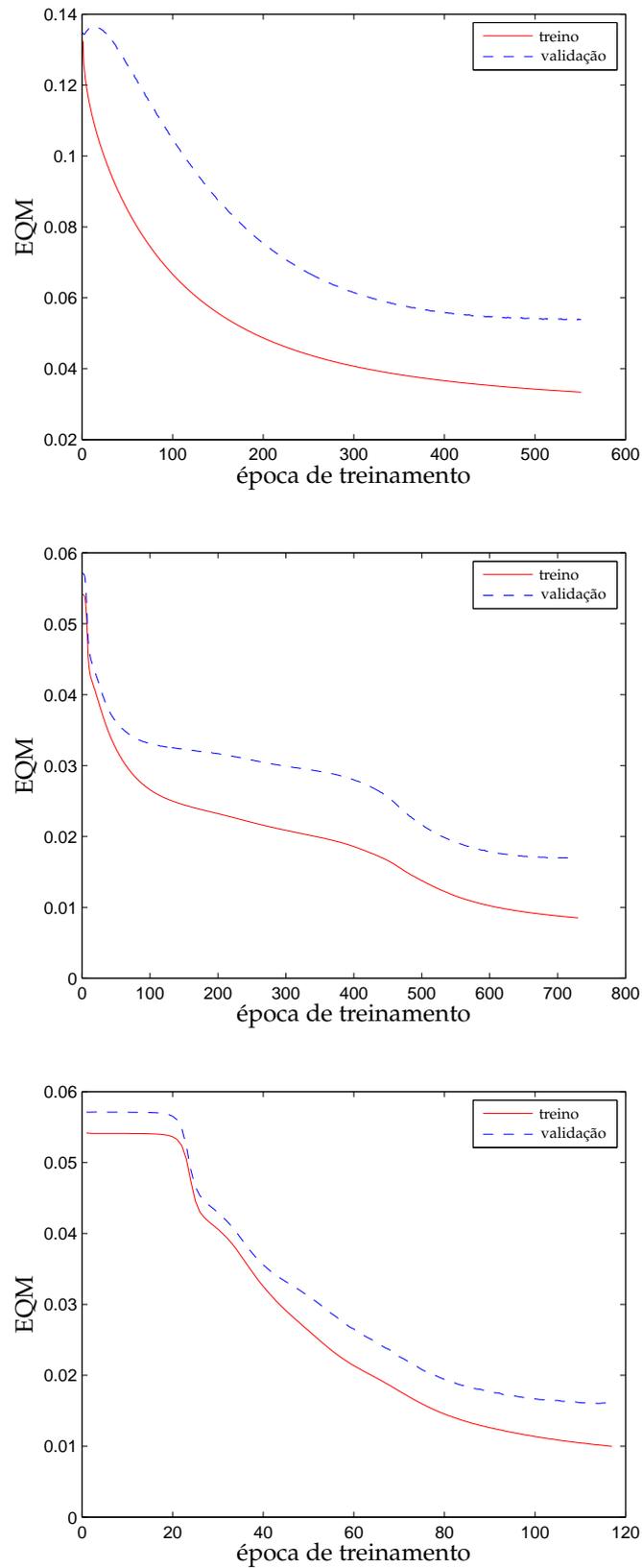


Figura 4.30: EQM de treino e de validação para a interface nL2Si, baseada no CLA (topo), na rede MLP com uma camada oculta (meio) e com duas camadas ocultas (abaixo), para o regime de operação misto com $SINR = -3$ dB.

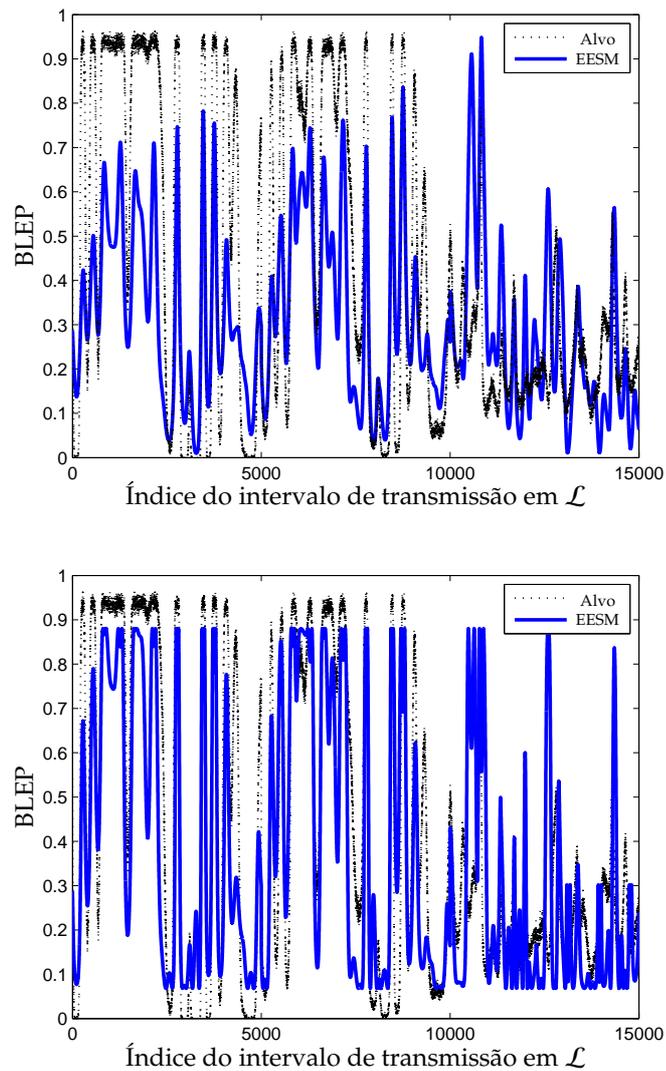


Figura 4.31: Resultados de predição obtidos através da interface EESM para o regime de operação misto com $SINR = -3$ dB: no canto superior, para a interface baseada na EESM com calibração realizada com polinômio de 1^o grau e, no canto inferior, 6^o grau.

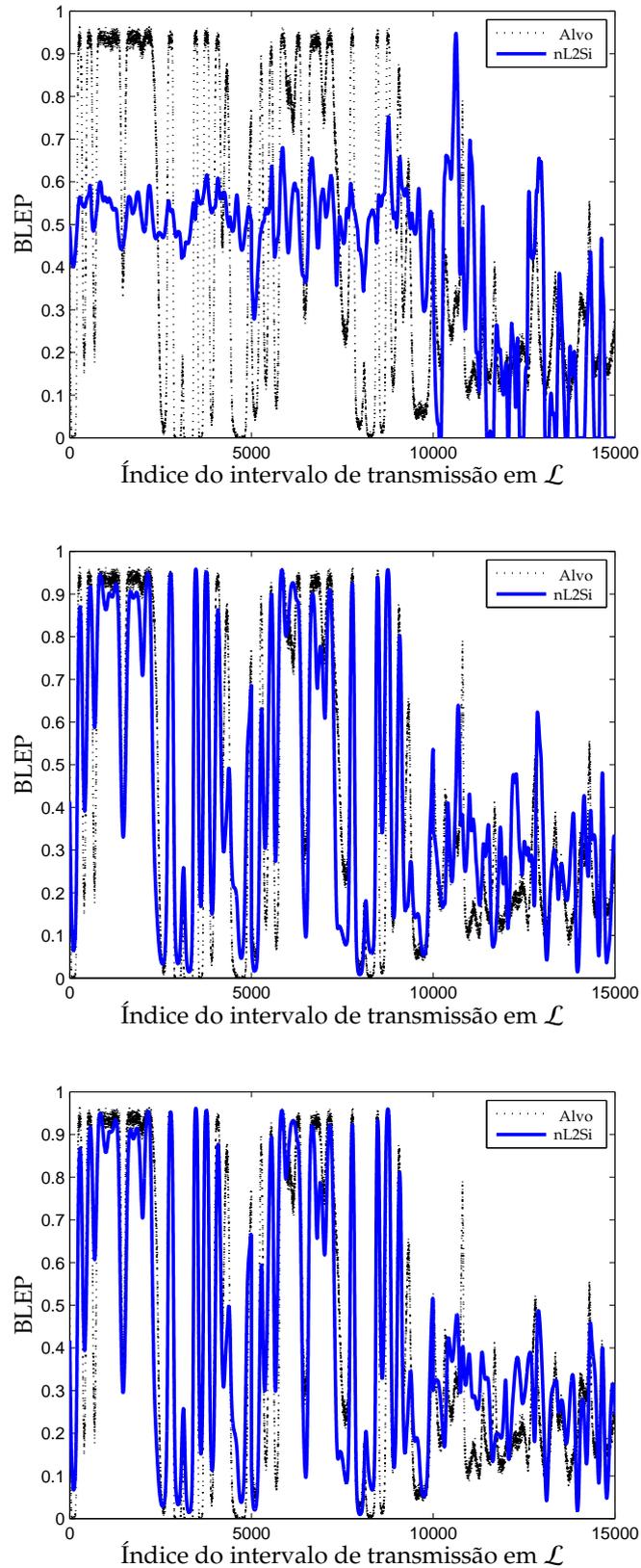


Figura 4.32: Resultados de previsão obtidos através das várias interfaces nL2Si para o regime de operação misto com $SINR = -3$ dB: no canto superior, para a interface baseada no CLA; no meio, para a interface baseada na rede MLP com uma camada oculta, e, no canto inferior, para a interface baseada na rede MLP com duas camadas ocultas.

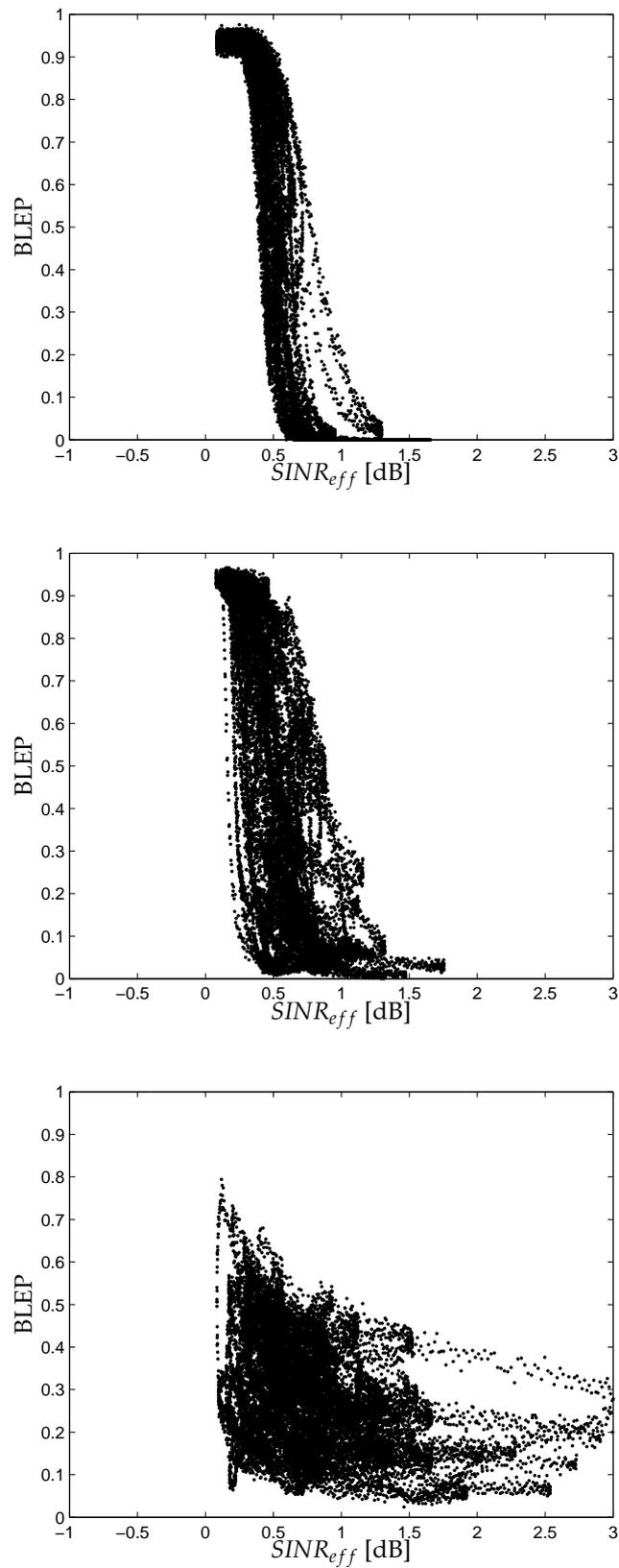


Figura 4.33: Gráficos de dispersão da interface EESM para os três regimes de operação individuais: (topo) PIN0, (médio) PIN1 e (abaixo) PIN2 a um valor médio de $SINR = -3$ dB.

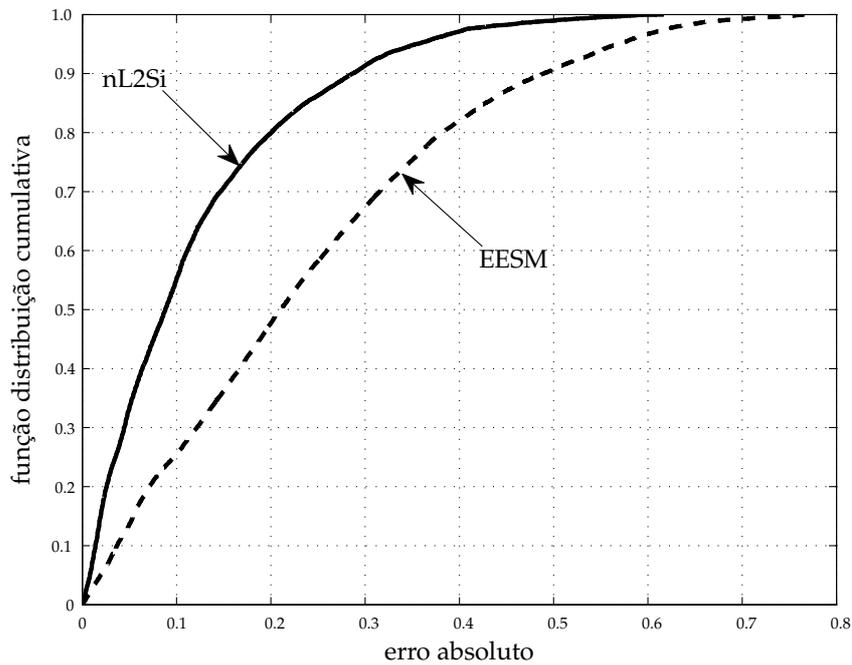


Figura 4.34: Função distribuição cumulativa dos valores absolutos dos erros de previsão causados pela interface L2S: EESM e nL2Si-MLP.

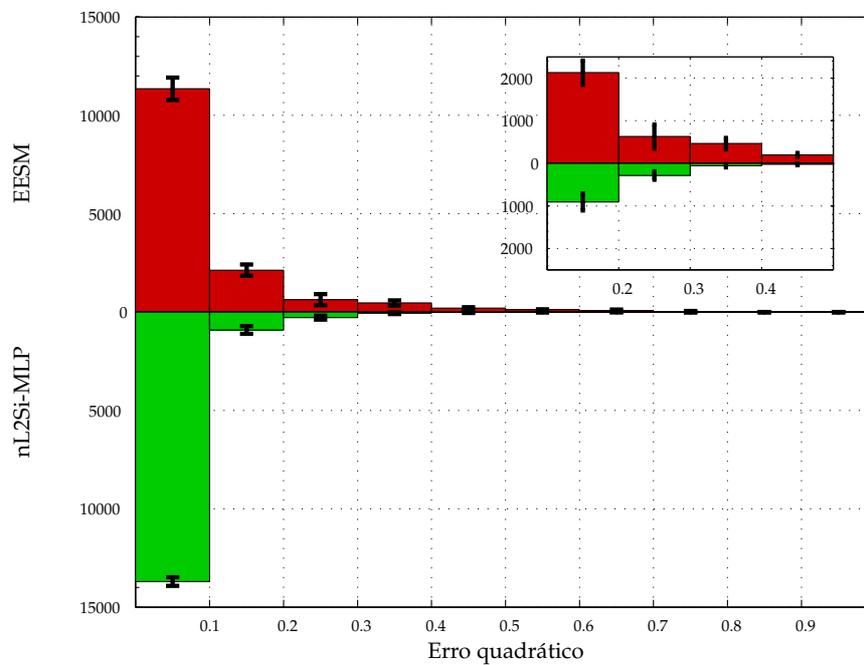


Figura 4.35: Histograma dos erros quadráticos de previsão da interface L2S proporcionados pela EESM e nL2Si-MLP sobre quatro realizações independentes do canal; o nível de confiança dos resultados é de 90%.

5 CONCLUSÃO

O CRESCIMENTO incessante do volume de tráfego nos sistemas de comunicações móveis tem motivado sua constante evolução tecnológica. Avançando em direção aos novos padrões das redes celulares, o *3rd. Generation Partnership Project* (3GPP) apostou na Evolução de Longo Prazo – LTE e LTE-A –, os quais contemplam tecnologias como múltiplas subportadoras ortogonais e coordenação entre os pontos de transmissão de modo a alcançar os novos requisitos de qualidade de serviços.

Por outro lado, todo esse avanço tecnológico tem tornado as tarefas de análise e modelagem do sistema mais complexas, por conta principalmente do aumento da dimensionalidade dos problemas envolvidos. Nesse momento, algumas metodologias até então bem consolidadas precisam ser revistas para que se adequem a essa evolução e permitam a apropriada exploração desses sistemas. Esta tese propôs-se a investigar as possibilidades oferecidas pela aprendizagem de máquinas neste contexto.

Partindo de um levantamento bibliográfico, foram constatados diversos casos de sucesso de aplicação de máquinas adaptativas em sistemas de comunicações móveis. As aplicações estenderam-se ao longo dos mais variados tópicos das comunicações móveis, tais como gerenciamento de recursos, adaptação da transmissão, projeto de arranjo de antenas, receptores, predição da propagação, análise de tráfego, provisão e rastreamento da mobilidade e operação e planejamento da rede. As capacidades de generalização, de modelar não linearidades e de aprender com base em dados confirmaram-se como os principais atrativos da aplicação de máquinas adaptativas frente a soluções clássicas. Destacou-se ainda a ampla utilização do aprendizado supervisionado – especialmente com a rede *multilayer perceptron* (MLP) – e do aprendizado por reforço.

Nessa mesma linha de investigação, a tese trouxe duas propostas inéditas, cada uma das quais tratando de um diferente problema e aplicando uma diferente máquina adaptativa. A primeira se refere ao agrupamento de pontos de transmissão em

um sistema com múltiplos pontos coordenados (CoMP) com base no algoritmo *k*-médias. A apropriada formulação do problema permitiu à máquina de aprendizado auto-organizado explorar o problema de uma forma nunca antes realizada, fornecendo uma interpretação alternativa. Ao invés de estabelecer diretamente o agrupamento dos pontos de transmissão (PTs), parte-se do agrupamento dos vetores de força do sinal dos equipamentos de usuários (EUs), e somente depois se agrupam os PTs. Através de simulações computacionais, avaliaram-se as perdas em termos de eficiência espectral sistêmica, as quais também devem ser levadas em consideração para a escolha do número de grupos, K , que seja mais apropriado. Os benefícios em termos de complexidade de cooperação foram significativos, tais como redução na quantidade de sinalização e na complexidade computacionais do pré-codificador e do escalonador, para cerca de $1/K$, $1/K^2$ e $1/K^3$, na mesma ordem. Tais benefícios são ampliados ainda mais com a adoção da seleção parcial de grupos. No entanto, há de se considerar que o aumento indiscriminado do número de grupos passa a ser desinteressante quando a carga de usuários não é expressiva.

A segunda proposta se refere à realização da interface enlace-a-sistema L2S por meio de redes neurais convencionais; trata-se da *neural link-to-system interface* (nL2Si). A insensibilidade dos métodos clássicos em discernir entre potência de ruído térmico e de interferência podem implicar inexatidões na avaliação de desempenho do enlace. O cenário principal foca-se nos usuários de borda de célula a uma relação SINR média fixa. Enquanto a SINR não seja muito baixa e/ou não haja variações temporais na potência média interferente, a solução clássica *exponential ESM* (EESM) mantém-se apropriada. Porém, quando esse tipo de variação ocorre, a abordagem proposta, baseada em rede neural artificial (RNA), mostrou-se mais eficiente, fornecendo resultados de predição de desempenho de enlace mais confiáveis. A proposição de uma nova métrica, denominada ocorrência de falhas graves (OFG), subsidiou conclusões acerca da menor nocividade da nL2Si aos mecanismos sistêmicos, e, por conseguinte, à plena exploração dos recursos disponíveis. Deve-se, no entanto, levar em conta a dificuldade em treinar a RNA. A escolha de muitos dos parâmetros é realizada de maneira empírica, não havendo garantia de encontrar a melhor configuração para a RNA. Além do mais, também não há garantia de encontrar o ótimo global, requerendo mecanismos junto aos processos de treinamento e validação que evitem tanto o subajustamento quanto o sobreajustamento da rede.

Portanto, confirmou-se a possibilidade de uma máquina adaptativa aplicada a um problema de comunicações móveis prover interpretação alternativa e solução eficiente

em comparação a abordagens clássicas e bem consolidadas. A diversidade de máquinas é um ponto favorável a adequar-se aos mais variados tipos de aplicações. Entretanto, não há garantias de que as máquinas adaptativas forneçam os melhores desempenhos em todos os cenários de aplicação.

5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Para ambas as propostas, há ainda muitas possibilidades não exploradas que podem ser consideradas para trabalhos futuros. Para o agrupamento de pontos de transmissão baseado no algoritmo k-médias, podemos listar como exemplos de continuidade:

- extensão para o caso com múltiplas antenas co-localizadas, tanto para os PTs quanto para os EU. A ideia aqui apresentada se preserva, no entanto, devendo atentar-se à adoção de um único vetor de força do sinal por EU, com comprimento dado pelo número de PTs candidatos a transmissão, independente da quantidade de antenas co-localizadas nos receptores e/ou transmissores;
- considerar outros modelos de canais, tais como o espacial, e, por consequência, também outros pré-codificadores, como, por exemplo, o *minimum mean square error* (MMSE). A correlação espacial pode afetar o condicionamento das matrizes de canal e, por consequência, prejudicar o cálculo do pré-codificador;
- estudar a priorização de EUs, como sugerido pela expressão (3.20), bem como avaliar novos escalonadores e modelos de tráfego, os quais tendem a afetar drasticamente os mecanismos de estimação da interferência;
- avaliar outros critérios de escolha dos PTs, como, por exemplo, reservar sucessivamente os PTs mais representativos com alternância de grupos. Outra alternativa seria reaplicar o algoritmo k-médias para formar K grupos, mas desta vez sobre os vetores protótipos organizados de modo que as amostras sejam K -dimensionais e indexadas pelo PT.

De maneira similar, para a realização da interface L2S através de redes neurais, podemos citar como possibilidades de trabalhos futuros:

- proceder ao treino e teste da rede neural alterando-se o número de subportadoras disponíveis, de modo a contemplar cenários multiusuários. Isso pode significar a mistura de conjuntos de treinos com muitas e poucas entradas habilitadas;

- comparação com outras máquinas, tais como *radial basis function* (RBF) e *support vector regression* (SVR);
- extensão para o caso *multiple input multiple output* (MIMO). Isso deve expandir ainda mais o tamanho da entrada da rede neural, entretanto, preservando todos os demais mecanismos apresentados;
- extensão para cenários menos severos em que modulações de mais alta ordem podem estar presentes, quando mecanismos de adaptação de enlace podem entrar no foco de estudo. A comparação com a interface *mutual-information ESM* (MIESM) torna-se essencial, visto que não se restringe que os múltiplos recursos sejam transmitidos com mesma *modulation and coding scheme* (MCS);
- aproveitamento da influência temporal, permitindo prever o comportamento das entradas de *signal-to-noise ratio* (SNR) e *interference-to-noise ratio* (INR), na figura dos canais móveis, bem como incluir mecanismos como *automatic repeat request* (ARQ) híbrido.

6 ATUALIZAÇÃO DE PESOS SINÁPTICOS PELO ALGORITMO DE RETROPROPAGAÇÃO

Neste capítulo, apresentam-se as expressões usadas para a atualização dos pesos na rede *multilayer perceptron* (MLP) descrita no capítulo 4. Os índices e variáveis adotados referem-se à Figura 4.18; adicionalmente, emprega-se uma notação simplificada para referenciar o sinal imediatamente anterior à função de ativação da primeira camada oculta, segunda camada oculta e de saída, respectivamente, por $u^{(1h)}$, $u^{(2h)}$ e $u^{(o)}$.

As expressões aqui apresentadas foram obtidas com base no desenvolvimento descrito em Haykin (2008), orientando-se pelo cálculo dos gradientes locais. A função custo considerada é obtida pela minimização de:

$$\xi(n) = \frac{1}{2}e^2(n). \quad (6.1)$$

A atualização dos pesos segue a regra delta, portanto, sendo descrita como:

$$\Delta v_{ik} = -\eta^{(o)} \frac{\partial \xi(n)}{\partial v_{ik}}, \quad (6.2a)$$

$$\Delta w_{ji} = -\eta^{(2h)} \frac{\partial \xi(n)}{\partial w_{ji}}, \quad (6.2b)$$

$$\Delta m_i = -\eta^{(1h)} \frac{\partial \xi(n)}{\partial m_i}. \quad (6.2c)$$

O gradiente local do neurônio da camada de saída é dado por:

$$\delta^{(o)}(n) = (p(n) - o(n)) \frac{\partial \psi(u(n))}{\partial u(n)}, \quad (6.3)$$

onde

$$\frac{\partial \psi(u^{(o)}(n))}{\partial u^{(o)}(n)} = ao(n)(1 - o(n)). \quad (6.4)$$

Por sua vez, os gradientes locais dos neurônios da última camada oculta são dados por:

$$\delta_j^{(2h)}(n) = \frac{\partial \varphi_j(u_j^{(2h)}(n))}{\partial u_j^{(2h)}(n)} \delta^{(o)}(n) m_j(n), \quad j = 1, \dots, L, \quad (6.5)$$

onde

$$\frac{\partial \varphi_j(u_j^{(2h)}(n))}{\partial u_j^{(2h)}(n)} = 2,574(1,716 - y_j(n))(1,716 + y_j(n)). \quad (6.6)$$

Os gradientes locais dos neurônios da primeira camada oculta são:

$$\delta_i^{(1h)}(n) = \frac{\partial \varphi_i(u_i^{(1h)}(n))}{\partial u_i^{(1h)}(n)} \sum_j^I \delta_j^{(2h)}(n) w_{ji}(n), \quad i = 1, \dots, I, \quad (6.7)$$

onde

$$\frac{\partial \varphi_i(u_i^{(1h)}(n))}{\partial u_i^{(1h)}(n)} = 2,574(1,716 - y_i(n))(1,716 + y_i(n)). \quad (6.8)$$

Assim, os vetores de pesos \mathbf{v}_i , \mathbf{w}_i e \mathbf{m} são atualizados por:

$$\Delta \mathbf{v}_i(n) = \theta_i^{(1h)} \Delta \mathbf{v}_i(n-1) + \eta_i^{(1h)} \delta_i^{(1h)}(n) \begin{bmatrix} 1 \\ \hat{\mathbf{y}}(n) \end{bmatrix}, \quad (6.9a)$$

$$\Delta \mathbf{w}_j(n) = \theta_j^{(2h)} \Delta \mathbf{w}_j(n-1) + \eta_j^{(2h)} \delta_j^{(2h)}(n) \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{y}(n) \end{bmatrix}, \quad (6.9b)$$

$$\Delta \mathbf{m}(n) = \theta^{(o)} \Delta \mathbf{m}(n-1) + \eta^{(o)} \delta^{(o)}(n) \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{z}(n) \end{bmatrix}, \quad (6.9c)$$

onde $0 < \eta_r^{(\ell)} < 1$ é a taxa de aprendizagem, e $0 < \theta_r^{(\ell)} < 1$ é a constante de momento do neurônio r da camada ℓ .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3GPP. TR25.814- *Physical Layer Aspects for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)*. [S.l.], Setembro 2006. Disponível em: <<http://www.3gpp.org>>.
- 3GPP. *Deployment aspects*. [S.l.], Dezembro 2008. Disponível em: <<http://www.3gpp.org>>. 3.1
- 3GPP. *Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations*. [S.l.], Dezembro 2008. 3.1, 4.2
- 3GPP. *Further advancements for E-UTRA physical layer aspects*. [S.l.], Março 2010. 3.1
- 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding*. [S.l.], Junho 2012. 4.5
- AAZHANG, B.; PARIS, B.-P.; ORSAK, G. C. Neural Networks for Multiuser Detection in Code-Division Multiple-Access Communications. *Communications, IEEE Transactions on*, v. 40, n. 7, p. 1212–1222, 1992.
- ACCIOLY, M. I. A. Da representação à simulação: a comunicação sob o paradigma da complexidade. *Observatorio (OBS*)*, v. 2, n. 4, 2008. ISSN 1646-5954. 4.1
- AHN, C. W.; RAMAKRISHNA, R. S. QoS provisioning dynamic connection-admission control for multimedia wireless networks using a Hopfield neural network. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 53, n. 1, p. 106–117, 2004.
- ALEXIOU, A.; ASTÉLY, D.; BRÜNINGHAUS, K.; CORONEL, P.; DÖTTLING, M.; FUCHS, M.; GIESE, J.; HAARDT, M.; HENNHÖFER, M.; JIANG, T.; JORSWIECK, E.; KAPUR, A.; LI, Z.; MEDLES, A.; MOUSLEY, T.; OLSSON, M.; ROBERTS, K.; ROUQUETTE-LÉVEIL, S.; SCHOTT, W.; SEZGIN, A.; SKILLERMARK, P.; STANKOVIC, V.; SVEDMAN, P.; VISURI, S.; WANG, D.; WILD, T.; ZIMMERMANN, E. *WINNER D2.7 ver 1.1 Assessment of Advanced Beamforming and MIMO Technologies*. [S.l.], Fevereiro 2005. 4.3
- ALPAYDIN, E. *Introduction to machine learning*. 2. ed. [S.l.]: Massachusetts Institute of Technology, 2010. ISBN 978-0-262-01243-0. 1.2, 3.4.1
- ARTHUR, D.; VASSILVITSKII, S. How slow is the k-means method? In: *Computational Geometry, Annual Symposium on*. Sedona, E.U.A.: [s.n.], 2006. p. 144 – 153. 3.4.1
- AYESTARÁN, R. G.; LAS-HERAS, F. Support Vector Regression for the Design of Array Antennas. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 4, n. 6, p. 414–416, 2005.

- BAI, D.; PARK, C.; LEE, J.; NGUYEN, H.; SINGH, J.; GUPTA, A.; PI, Z.; KIM, T.; LIM, C.; KIM, M.-G.; KANG, I. LTE-advanced modem design: challenges and perspectives. *Communications Magazine, IEEE*, v. 50, n. 2, p. 178 –186, Fevereiro 2012. ISSN 0163-6804. 1.1
- BAILEY, D. H.; FERGUSON, H. R. P. A strassen-newton algorithm for high-speed parallelizable matrix inversion. In: *Supercomputing, ACM/IEEE conference on*. Orlando, E.U.A.: [s.n.], 1988. p. 419 – 424. 3.2.1
- BAKER, M. From LTE-advanced to the future. *Communications Magazine, IEEE*, v. 50, n. 2, p. 116 –120, Fevereiro 2012. ISSN 0163-6804. 1.1
- BALIS, P. G.; HINTON, O. R. Characterisation of mobile velocity in GSM using a simple feed-forward neural network. *Electronics Letters*, v. 34, n. 19, p. 1810–1811, 1998.
- BARACCA, P.; BOCCARDI, F.; HUANG, H. A dynamic joint clustering scheduling algorithm for downlink CoMP systems with limited CSI. In: *International Symposium on Wireless Communication Systems, IEEE*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 830 – 834.
- BARRETO, G.; MOTA, J.; SOUZA, L.; FROTA, R.; AGUAYO, L. Condition monitoring of 3g cellular networks through competitive neural models. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, v. 16, n. 5, p. 1064 –1075, Setembro 2005. ISSN 1045-9227.
- BATISTA, R. L. *Radio Resource Allocation for Coordinated Multi-Point Systems*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, Agosto 2011. 3.1.1
- BISHOP, C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2006.
- BOCCARDI, F.; HUANG, H. Limited downlink network coordination in cellular networks. In: *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1 –5. 3.3
- BRUENINGHAUS, K.; ASTÉLY, D.; SÄLZER, T.; VISURI, S.; ALEXIOU, A.; KARGER, S.; SERAJI, G.-A. Link performance models for system level simulations of broadband radio access systems. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, v. 4, p. 2306–2311, Setembro 2005. 1.1, 4.1, 4.1.2, 4.3, 4.3
- CALABUIG, D.; MONSERRAT, J. F.; GÓMEZ-BARQUERO, D.; LÁZARO, O. User bandwidth usage-driven HNN neuron excitation method for maximum resource utilization within packet-switched communication networks. *Communications Letters, IEEE, IEEE*, v. 10, n. 11, p. 766–768, 2006.
- CALABUIG, D.; MONSERRAT, J. F.; MARTÍN-SACRISTÁN, D.; CARDONA, N. Joint Dynamic Resource Allocation for QoS Provisioning in Multi-Access and Multi-Service Wireless Systems. *Mobile Networks and Applications, Springer*, p. 627–638, 2010.
- CALVO, D. B. *Fairness Analysis of Wireless Beamforming Schedulers*. Tese (Doutorado) — Technical University of Catalonia, Espanha, Novembro 2004. 3.5.1

- CAVIGLIONE, L. A simple neural framework for bandwidth reservation of VoIP communications in cost-effective devices. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, v. 56, n. 3, p. 1252–1257, Agosto 2010. ISSN 0098-3063.
- CHANG, P.-R.; YANG, W.-H.; CHAN, K.-K. A Neural Network Approach to MVDR Beamforming Problem. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 40, n. 3, p. 313–322, 1992.
- CHATTERJEE, M.; DAS, S. K. Vector quantization based QoS classification for admission control in CDMA systems. *Wireless Networks, Springer*, p. 709–718, 2005.
- CHEN, L.; CHEN, W.; WANG, B.; ZHANG, X.; CHEN, H.; YANG, D. System-level simulation methodology and platform for mobile cellular systems. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 7, Julho 2011.
- CHEN, S.; HANZO, L.; TAN, S. Symmetric Complex-Valued RBF Receiver for Multiple-Antenna-Aided Wireless Systems. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 9, p. 1657–1663, 2008.
- CHENG, J.-F. Modeling coding performance with nonideal channel estimation for dynamic system simulators. In: *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall. 2006 IEEE 64th*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1 – 6.
- CHOI, W.; ANDREWS, J. G. Distributed antenna systems: Open architecture for future wireless communications. In: _____. [S.l.]: Taylor & Francis, 2007. cap. Theoretical Limits of Cellular Systems with Distributed Antennas. 3
- CHUA, L. O.; YANG, L. Cellular Neural Networks: Theory. *Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, v. 35, n. 10, p. 1257–1272, 1988.
- CHUAH, T. C.; SHARIF, B. S.; HINTON, O. R. Robust adaptive spread-spectrum receiver with neural net preprocessing in non-Gaussian noise. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, v. 12, n. 3, p. 546–558, 2001.
- CIPRIANO, A.; VISOZ, R.; SALZER, T. Calibration issues of PHY layer abstractions for wireless broadband systems. In: *IEEE Vehicular Technology Conference - Fall*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1 –5. ISSN 1090-3038.
- COLOMA, J.; CARRASCO, R. A. MLP equaliser for frequency selective time-varying channels. *Electronics Letters*, v. 30, n. 6, p. 503–504, 1994.
- COPPERSMITH, D.; WINOGRAD, S. Matrix multiplication via arithmetic progressions. *J. Symbolic Computation*, v. 9, n. 3, p. 251 – 280, 1990. 3.2.1
- CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. *Introduction to Algorithms*. 3. ed. E.U.A.: MIT Press, 2009. ISBN 978-0-262-03384-8. 5
- COSTA, M. Writing on dirty paper (corresp.). *Information Theory, IEEE Transactions on*, v. 29, n. 3, p. 439 – 441, Maio 1983. ISSN 0018-9448. 3.1.1
- DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKÖLD, J. *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. [S.l.]: Elsevier, 2011. ISBN 978-0123854896. 3.5.1, 2

- DANIELS, R. C.; Heath Jr., R. W. An Online Learning Framework for Link Adaptation in Wireless Networks. In: *Information Theory and Applications Workshop*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 138–140.
- DAS, K.; MORGERA, S. D. Adaptive interference cancellation for DS-CDMA systems using neural network techniques. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 16, n. 9, p. 1774–1784, 1998.
- DOHLER, M.; HEATH, R.; LOZANO, A.; PAPADIAS, C.; VALENZUELA, R. Is the PHY layer dead? *Communications Magazine, IEEE*, v. 49, n. 4, p. 159–165, Abril 2011. ISSN 0163-6804.
- DONTHI, S.; MEHTA, N. An accurate model for EESM and its application to analysis of CQI feedback schemes and scheduling in LTE. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 10, n. 10, p. 3436–3448, Outubro 2011. ISSN 1536-1276.
- EL-ALFY, E.-S.; YAO, Y.-D.; HEFFES, H. A Learning Approach for Prioritized Handoff Channel Allocation in Mobile Multimedia Networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 5, n. 7, p. 1651–1660, 2006.
- EL-KHATIB, K. Impact of Feature Reduction on the Efficiency of Wireless Intrusion Detection Systems. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 8, p. 1143–1149, Agosto 2010. ISSN 1045-9219.
- FANG, S.-H.; HSU, Y.-T.; KUO, W.-H. Dynamic Fingerprinting Combination for Improved Mobile Localization. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 10, n. 12, p. 4018–4022, Dezembro 2011. ISSN 1536-1276.
- FANG, S.-H.; LU, B.-C.; HSU, Y.-T. Learning Location From Sequential Signal Strength Based on GSM Experimental Data. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 61, n. 2, p. 726–736, 2012.
- FARRUGIA, R. A.; DEBONO, C. J. A support vector machine approach for detection and localization of transmission errors within standard H. 263++ decoders. *Multimedia, IEEE Transactions on*, v. 11, n. 7, p. 1323–1330, 2009.
- FENG, Z.; MUQING, W.; HUIXIN, L. Coordinated Multi-Point Transmission and Reception for LTE-Advanced. In: . [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–4. 3.1
- FIENGO, P.; GIAMBENE, G.; TRENTIN, E. Neural-based downlink scheduling algorithm for broadband wireless networks. *Computer Communications, Elsevier*, v. 30, n. 2, p. 207–218, 2007.
- FRIGG, R. *Scientific Representation and the Semantic View of Theories*. Março 2006. Disponível em: <<http://philsci-archive.pitt.edu/2926/>>. 1
- GESBERT, D.; HANLY, S.; HUANG, H.; SHITZ, S. S.; SIMEONE, O.; YU, W. Multi-cell MIMO cooperative networks: A new look at interference. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 28, n. 9, p. 1380–1408, Dezembro 2010. ISSN 0733-8716. 3, 3.1, 3.1

- GIUPPONI, L.; AGUSTÍ, R.; PÉREZ-ROMERO, J.; SALLEN, O. Fuzzy Neural Control for Economic-Driven Radio Resource Management in Beyond 3G Networks. *Systems, Man, and Cybernetics, IEEE Transactions on*, v. 39, n. 2, p. 170–189, 2009.
- GUNNARSSON, F.; JOHANSSON, M.; FURUSKÄR, A.; LUNDEVALL, M.; SIMONSSON, A.; TIDESTAV, C.; BLOMGREN, M. Downtilted base station antennas - a simulation model proposal and impact on HSPA and LTE performance. In: *IEEE Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–5. ISSN 1090-3038. 4.2
- HANSEN, P.; JAUMARD, B. Cluster analysis and mathematical programming. *Mathematical Programming*, v. 79, n. 1-3, p. 191–215, Outubro 1997. 3.4.1, 3.4.1
- HANZAZ, Z.; SCHOTTEN, H. Comparison of link to system interface models for WiMAX system. In: *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, International Congress on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1 – 6. ISSN 2157-0221.
- HAR-PELED, S.; SADRI, B. How fast is the k-means method? In: *Discrete algorithms, ACM-SIAM Symposium on*. Vancouver, CA: [s.n.], 2005. p. 877 – 885. 3.4.1
- HASSOUN, M. H. *Fundamentals of Artificial Neural Networks*. [S.l.]: MIT Press, 1995. ISBN 978-0262082396.
- HAYKIN, S. *Neural Networks and Learning Machines*. [S.l.]: Pearson, 2008. 1, 3.4.1, 4.4, 4.4.1, 4.4.1, 4.4.2, 4.4.2, 4.4.3
- HE, A.; BAE, K. K.; NEWMAN, T. R.; GAEDDERT, J.; KIM, K.; MENON, R.; MORALES-TIRADO, L.; NEEL, J. J.; ZHAO, Y.; REED, J. H.; TRANTER, W. H. A survey of artificial intelligence for cognitive radios. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 59, n. 4, p. 1578–1592, 2010.
- HE, X.; NIU, K.; HE, Z.; LIN, J. Link layer abstraction in MIMO-OFDM system. In: *Cross Layer Design, International Workshop on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 41 – 44.
- HELMY, M. O.; ZAKI, F. W. Identification of Linear bi-dimensional digital modulation schemes via clustering algorithms. In: *Computer Engineering & Systems, International Conference on*. [S.l.]: Ieee, 2009. p. 385–390. ISBN 978-1-4244-5842-4.
- HOLMA, H. *A Study of UMTS Terrestrial Radio Access Performance*. Tese (Doutorado) — Helsinki University of Technology, Espoo, Finlândia, Outubro 2003. 1.1, 4.1, 4.1.2, 4.3
- HONGSAKHAM, W.; PATTARA-ATIKOM, W.; PEACHAVANISH, R. Estimating road traffic congestion from cellular handoff information using cell-based neural networks and K-means clustering. In: *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, International Conference on*. [S.l.]: Ieee, 2008. p. 13–16. ISBN 978-1-4244-2101-5.
- HUANG, F.; WANG, Y.; GENG, J.; WU, M.; YANG, D. Clustering approach in coordinated multi-point transmission/reception system. In: *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1 –5. ISSN 1090-3038. 3.3

- HUNGER, R. *Floating Point Operations in Matrix-Vector Calculus*. Alemanha, Setembro 2007. 3.1.1
- IEEEXPLORE. *IEEEExplore*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore>>. 2.1
- IKUNO, J. C.; PENDL, S.; SIMKO, M.; RUPP, M. Accurate SINR estimation model for system level simulation of LTE networks. In: *IEEE International conference on Communications 2011 (ICC)*. Ottawa, Canada: [s.n.], 2012. 4.1
- IKUNO, J. C.; WRULICH, M.; RUPP, M. System level simulation of LTE networks. In: *Proc. 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference: VTC2010-Spring*. Taipei: [s.n.], 2010. 4.1, 4.3
- INABA, M.; KATOH, N.; IMAI, H. Applications of weighted voronoi diagrams and randomization to variance-based k-clustering. In: *Computational Geometry, Annual Symposium on*. Stony Brook, E.U.A.: [s.n.], 1994. p. 332 – 339. ISBN 0-89791-648-4. 3.4.1, 6
- ITU. *Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000*. [S.l.], 1997. Disponível em: <<http://www.itu.int>>. (document), 4.5.1, 4.1
- _____. *Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced)*. [S.l.], Janeiro 2012. Disponível em: <www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2012-0-201201-I!!PDF-E.pdf>. 3
- ITU. *Mobile-cellular subscriptions (2000-2011)*. ITU, 2012. Dados obtidos em acesso realizado aos 25 de Maio de 2.012. Disponível em: <<http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics%20-%20/>>. 1
- JAKES, W. C. *Microwave mobile communications*. 1st. ed. Nova Iorque, E.U.A.: John Wiley & Sons, 1974. 3.1
- JERUCHIM, M. C.; BALABAN, P.; SHANMUGAN, K. S. *Simulation of communication systems: modeling, methodology and techniques*. 1. ed. [S.l.]: Kluwer Academic, 2000. ISBN 0306462672. 4.1, 4.1.2, 4.3
- KHAN, A.; QADEER, M.; ANSARI, J.; WAHEED, S. 4G as a next generation wireless network. In: *Future Computer and Communication, 2009. ICFCC 2009. International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 334 –338. 1
- KHAN, A.; SUN, L.; IFEACHOR, E. Learning models for video quality prediction over wireless local area network and universal mobile telecommunication system networks. *Communications, IET*, v. 4, n. 12, p. 1389–1403, 2010. ISSN 17518628.
- KRENKER, A.; VOLK, M.; SEDLAR, U.; BEŠTER, J.; KOS, A. Bidirectional artificial neural networks for mobile-phone fraud detection. *ETRI Journal*, v. 31, n. 1, p. 92–94, 2009.
- LAIHO, J.; RAIVIO, K.; LEHTIMÄKI, P.; HÄTÖNEN, K.; SIMULA, O. Advanced analysis methods for 3G cellular networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 4, n. 3, p. 930–942, 2005.

- LATIF, I.; KALTENBERGER, F.; KNOPP, R. Link abstraction for multi-user MIMO in LTE using interference-aware receiver. In: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 842 – 846. ISSN 1525-3511.
- LEE, W.; LEE, I.; KWAK, J. S.; IHM, B.-C.; HAN, S. Multi-BS MIMO cooperation: challenges and practical solutions in 4G systems. *Wireless Communications, IEEE*, v. 19, n. 1, p. 89 –96, Fevereiro 2012. ISSN 1536-1284. 1.1
- LEI, H.; ZHANG, L.; ZHANG, X.; YANG, D. System level evaluation of 3G long term evolution. In: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1 – 5. 4.3
- LIASKOS, C. K.; PETRIDOU, S. G.; PAPADIMITRIOU, G. I.; NICOPOLITIDIS, P.; POMPORTSIS, A. S.; OBAIDAT, M. S. Clustering-Driven Wireless Data Broadcasting. *Wireless Communications, IEEE*, n. December, p. 80–87, 2009.
- LIMA, C. H. M. de; STANCANELLI, E. M. G.; RODRIGUES, E. B.; MACIEL, J. M. S.; CAVALCANTI, F. R. P. A software development framework based on C++ OOP language for link-level simulation tools. In: *International Telecommunications Symposium*. [S.l.: s.n.], 2006.
- LIU, D.; ZHANG, Y.; ZHANG, H. A self-learning call admission control scheme for CDMA cellular networks. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, v. 16, n. 5, p. 1219–28, Setembro 2005. ISSN 1045-9227.
- LIU, L.; CHEN, R.; GEIRHOFER, S.; SAYANA, K.; SHI, Z.; ZHOU, Y. Downlink MIMO in LTE-advanced: SU-MIMO vs. MU-MIMO. *Communications Magazine, IEEE*, v. 50, n. 2, p. 140 –147, Fevereiro 2012. ISSN 0163-6804. 1.1
- LONG, H.; WANG, W.; ZHENG, K.; YOUNG-IL, K. Two modified L2S interface methods for mixed modulation scheme. In: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008, IEEE International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1 –5.
- MACIEL, T. F. *Suboptimal Resource Allocation for Multi-User MIMO-OFDMA Systems*. Tese (Doutorado) — TU Darmstadt, 2008. Disponível em: <<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/1044/1/thesis.pdf>>. 3.1.1
- MacQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Mathematical Statistics and Probability, Berkeley Symposium on*. Los Angeles, E.U.A.: [s.n.], 1966. v. 1, p. 281 – 297. 3.4.1
- MAJUMDAR, K.; DAS, N. Mobile User Tracking Using A Hybrid Neural Network. *Wireless Networks, Springer*, v. 11, n. 3, p. 275–284, Maio 2005. ISSN 1022-0038.
- MARQUES, J. S. *Reconhecimento de Padrões: Métodos Estatísticos e Neurais*. 2a edição. ed. [S.l.]: IST Press, 2005. 284 p. ISBN 978-972-8469-08-5. 4.4.3
- MITRA, U.; POOR, V. Neural network techniques for adaptive multiuser demodulation. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 12, n. 9, p. 1460–1470, 1994.
- MOTCHENBACHER, C. D.; CONNELLY, J. A. *Low-Noise Electronic System Design*. [S.l.]: Wiley, 1993. ISBN 978-0-471-57742-3. 4.2

- MOZER, M. C.; WOLNIEWICZ, R.; GRIMES, D. B.; JOHNSON, E.; KAUSHANSKY, H. Predicting Subscriber Dissatisfaction and Improving Retention in the Wireless Telecommunications Industry. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, v. 11, n. 3, p. 690–696, 2000.
- NELLES, O. *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*. Alemanha: Springer, 2000. 4.1.2
- NEŠKOVIĆ, A.; NEŠKOVIĆ, N.; PAUNOVIĆ, Đ. Indoor electric field level prediction model based on the artificial neural networks. *Communications Letters, IEEE*, v. 4, n. 6, p. 190–192, 2000.
- NG, S. X.; YEE, M.-S.; HANZO, L. Coded modulation assisted radial basis function aided turbo equalization for dispersive Rayleigh-fading channels. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 6, p. 2198–2206, 2004.
- Nokia Siemens Networks. 2020: Beyond 4G radio evolution for the gigabit experience. 2011. Disponível em: <www.nokiasiemensnetworks.com>. 1
- _____. Long term HSPA evolution meets ITU IMT-advanced requirements. 2012. Disponível em: <www.nokiasiemensnetworks.com>. 1
- OBORINA, A.; MOISIO, M. Speed up of effective SINR mapping calculations for system level simulations. In: *Antennas and Propagation, European Conference on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1 – 6.
- OLOFSSON, H.; ALMGREN, M.; JOHANSSON, C.; HÖÖK, M.; KRONESTEDT, F. Improved interface between link level and system level simulations applied to GSM. *IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications*, v. 1, p. 79–83, Outubro 1997. 4.1, 4.1.2, 4.3
- ÖSTLIN, E.; ZEPERNICK, H.-J.; SUZUKI, H. Macrocell path-loss prediction using artificial neural networks. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 59, n. 6, p. 2735–2747, 2010.
- PAIREEKRENG, W.; WONG, K. W. Client-side mobile user profile for content management using data mining techniques. In: *Natural Language Processing, International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 96–100. ISBN 9781424441396. 2.2.6
- PALICOT, J.; ROLAND, C. A new concept for wireless reconfigurable receivers. *Communications Magazine, IEEE*, n. July, p. 124–132, 2003.
- PAN, V. How can we speed up matrix multiplication. *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Review*, v. 26, n. 3, p. 393 – 415, Julho 1984. 3.2.1, 3.2.1
- PAPADOGIANNIS, A.; ALEXANDROPOULOS, G. The value of dynamic clustering of base stations for future wireless networks. In: *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1 –6. ISSN 1098-7584. 1.1, 3, 3.3
- PAPADOGIANNIS, A.; GESBERT, D.; HARDOUIN, E. A dynamic clustering approach in wireless networks with multi-cell cooperative processing. In: *IEEE International Conference on Communications*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 4033 –4037. 1.1, 3.3

- PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. 4. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Europe, 2002. ISBN 978-0071226615. 4.1.2, 3
- PARKVALL, S.; DAHLMAN, E.; FURUSKÄR, A.; JADING, Y.; OLSSON, M.; WÄNSTEDT, S.; ZANGLI, K. LTE-Advanced - Evolving LTE towards IMT-Advanced. In: *IEEE Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–5. 3.1
- PASTORINO, M.; RANDAZZO, A. A Smart Antenna System for Direction of Arrival Estimation Based on a Support Vector Regression. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 53, n. 7, p. 2161–2168, 2005. 2.2.3
- PAULI, M.; WACHSMANN, U.; TSAI, S.-H. S. *Quality Determination for a Wireless Communications Link*. Novembro 2004. United States Patent Application Publication. 4.3
- PEDERSEN, K.; KOLDING, T.; FREDERIKSEN, F.; KOVACS, I.; LASELVA, D.; MOGENSEN, P. An overview of downlink radio resource management for UTRAN long-term evolution. *Communications Magazine, IEEE*, v. 47, n. 7, p. 86–93, Julho 2009. ISSN 0163-6804. 1.1
- PICKHOLTZ, R.; SCHILLING, D.; MILSTEIN, L. Theory of spread-spectrum communications – a tutorial. *Communications, IEEE Transactions on*, v. 30, n. 5, p. 855 – 884, Maio 1982. ISSN 0090-6778. 4.1.2
- PLUMB, M. Fantastic 4G. *Spectrum, IEEE*, v. 49, n. 1, p. 51 –53, Janeiro 2012. ISSN 0018-9235. 1
- QUINTERO, A. A user pattern learning strategy for managing users' mobility in UMTS networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, v. 4, n. 6, p. 552–566, 2005.
- QUIROGA, F. A. *Link-to-System Interfaces for System Level imulations Featuring Hybrid ARQ*. Dissertação (Mestrado) — Technische Universität München, Alemanha, Novembro 2008.
- RAJU, K.; RISTANIEMI, T.; KARHUNEN, J.; OJA, E. Jammer suppression in DS-CDMA arrays using independent component analysis. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 5, n. 1, p. 77–82, Janeiro 2006. ISSN 1536-1276.
- RAMÓN, M. M.; XU, N.; CHRISTODOULOU, C. G. Beamforming using support vector machines. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, v. 4, n. 1, p. 439–442, 2005.
- RANDAZZO, A.; ABOU-KHOUSA, M. A.; PASTORINO, M.; ZOUGHI, R. Direction of arrival estimation based on support vector regression: Experimental validation and comparison with MUSIC. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 6, p. 379–382, 2007. 2.2.3
- RAPPAPORT, T. S.; REED, J. H.; WOERNER, B. D. Position Location Using Wireless Communication on Highways of the Future. *Communications Magazine, IEEE*, v. 34, n. 10, 1996. 2.2.7

- RATHINASABAPATHY, M.; NAKKEERAN, R. Performance analysis of adaptive OFDM system for broadband power line network. In: *Advances in Engineering, Science and Management, International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 167 – 173.
- RAYCHAUDHURI, D.; MANDAYAM, N. Frontiers of wireless and mobile communications. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. 4, p. 824 –840, Abril 2012. ISSN 0018-9219. 1.1
- RENGARAJAN, B.; VECIANA, G. de. Architecture and Abstractions for Environment and Traffic-Aware System-Level Coordination of Wireless Networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, v. 19, n. 3, p. 721–734, Junho 2011. ISSN 1063-6692.
- REUTERS, T. *Web of Science*. Thomson Reuters, 2012. Dados obtidos em acesso realizado aos 16 de Maio de 2.012. Disponível em: <http://thomsonreuters.com/products_services/science/science_products/a-z/web_of_science/>. 2.1
- ROUSSEEUW, P. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 20, n. 1, p. 53 – 65, Novembro 1987. 7
- RUBERG, A. *Frequency Domain Link Adaptation for OFDM-based Cellular Packet Data*. Dissertação (Mestrado) — Linköpings universitet, Linköping, Suécia, Março 2006. 4.3.1
- SALCIC, Z.; CHAN, E. Mobile station positioning using GSM cellular phone and artificial neural networks. *Wireless Personal Communications, Kluwer*, p. 235–254, 2000.
- SAVAZZI, P.; FAVALLI, L.; COSTAMAGNA, E.; MECOCCHI, A. A suboptimal approach to channel equalization based on the nearest neighbor rule. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 16, n. 9, p. 1640–1648, 1998.
- SHEN, S.; CHANG, C.-J.; HUANG, C.; BI, Q. Intelligent call admission control for wideband CDMA cellular systems. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 5, p. 1810–1821, 2004.
- SHEN, S.; CHANG, C.-J.; WANG, L.-C. A cellular neural network and utility-based radio resource scheduler for multimedia CDMA communication systems. *Wireless Communications, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 8, n. 11, p. 5508–5519, 2009.
- SIKAVARA, K.; GOULEMES, V. Artificial Neural Network and Analytical Method-Based Control of Higher Harmonic Radiation From Active Antenna Arrays. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, v. 7, p. 26–30, 2008. ISSN 1536-1225.
- SIMON, M. K.; OMURA, J. K.; SCHOLTZ, R. A.; LEVITT, B. K. *Spread Spectrum Communication Handbook*. 1a rev. ed. E.U.A.: McGraw-Hill, 1994. 4.1.2
- SONG, H.; KWAN, R.; ZHANG, J. Approximations of EESM effective SNR distribution. *Communications, IEEE Transactions on*, v. 59, n. 2, p. 603 – 612, Fevereiro 2011. ISSN 0090-6778.

- SOUTHALL, H. L.; SIMMERS, J. A.; O'DONNELL, T. H. Direction Finding in Phased Arrays with a Neural Network Beamformer. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 43, n. 12, p. 1369–1374, 1995.
- STANCANELLI, E. M. G.; CAVALCANTI, F. R. P.; SILVA, Y. C. B. Revisiting the effective SINR mapping interface for link and system level simulations of wireless communication systems. *IEEE Latin-American Conference on Communications*, p. 1 – 6, Outubro 2011.
- STANCANELLI, E. M. G.; LIMA, C. H. M. de; MOREIRA, D. C. Optimizing wireless communication systems. In: _____. [S.l.]: Springer, 2009. cap. Strategies for Link-level Performance Assessment in the Simulation of Wireless Systems. 4.1, 4.1.1, 2, 6
- STOCKER, K. E.; LANDSTORFER, F. M. Empirical prediction of radiowave propagation by neural network simulator. *Electronics Letters*, v. 28, n. 8, p. 724–726, 1992.
- STRASSEN, V. Gaussian elimination is not optimal. *Numerical Mathematics*, v. 13, p. 354 – 356, 1969. 3.2.1
- SZILÁGYI, P.; NOVÁ CZKI, S. An automatic detection and diagnosis framework for mobile communication systems. *Network and Service Management, IEEE Transactions on*, v. 9, n. 2, p. 184 –197, Julho 2012. ISSN 1932-4537.
- TAMIMI, A. K. A. *Exponential Effective Signal to Noise Ratio Mapping (EESM) computation for WiMAX Physical Layer*. Dissertação (Mestrado) — Washington University Sever Institute, St. Louis, E.U.A., Maio 2007. 4.3
- TAO, T.; CZYLWIK, A. Performance analysis of link adaptation in LTE systems. In: *Smart Antennas, International ITG Workshop on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1 –5. 4.3
- TEJERA, P.; UTSCHICK, W.; BAUCH, G.; NOSSEK, J. A. Subchannel allocation in multiuser Multiple-Input-MultipleOutput systems. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 52, n. 10, p. 4721–4733, Outubro 2006. 3.1.1
- TSAI, S. S.; SOONG, A. C. K. *Effective-SNR Mapping for Modeling Frame Error Rates in Multiple-state Channels*. [S.l.], Abril 2003. Disponível em: <<http://www.3gpp.org>>. 4.3
- TSE, D.; VISWANATH, P. *Fundamentals of wireless communications*. 1st. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.
- TUOMAALA, E.; WANG, H. Effective SINR approach of link to system mapping in OFDM/multi-carrier mobile network. *2nd International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems*, v. 2, Novembro 2005. 4.1, 4.3
- _____. Effective SINR approach of link to system mapping in OFDM/multi-carrier mobile network. In: *Mobile Technology, Applications and Systems, International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1 – 5.
- TUTSCHKU, K.; TRAN-GIA, P. Spatial Traffic Estimation and Characterization for Mobile Communication Network Design. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 16, n. 5, p. 804–811, 1998. 2.2.6

- VERDÚ, S. *Multiuser Detection*. E.U.A.: Cambridge University Press., 1998. 2.2.4
- VILLIERS, J. de; BARNARD, E. Backpropagation neural nets with one and two hidden layers. *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 4, n. 17, p. 136 – 141, 1992.
- VUČEVIĆ, N.; PÉREZ-ROMERO, J.; SALLEN, O.; AGUSTÍ, R. Reinforcement learning for joint radio resource management in LTE-UMTS scenarios. *Computer Networks, Elsevier*, v. 55, p. 1487–1497, 2011.
- WANG, C.; LIN, T. Application of neural networks for achieving 802.11 QoS in heterogeneous channels. *Computer Networks, Elsevier*, v. 52, p. 581–592, 2008.
- WANG, C.; LIN, T.; CHEN, J.-L. A cross-layer adaptive algorithm for multimedia QoS fairness in WLAN environments using neural networks. *Communications, IET, IET*, v. 1, n. 5, p. 858–865, 2007.
- WANG, J.; URRIZA, P.; HAN, Y.; CABRIC, D. Weighted Centroid Localization Algorithm: Theoretical Analysis and Distributed Implementation. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 10, n. 10, p. 3403–3413, 2011.
- WANG, X.-a.; WICKER, S. B. An artificial neural net Viterbi decoder. *Communications, IEEE Transactions on*, v. 44, n. 2, p. 165–171, 1996.
- WEISSTEIN, E. W. Least squares fitting. *MathWorld – A Wolfram Web Resource*, 2012. Acesso realizado aos 31 de Julho de 2.012. Disponível em: <<http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html>>. 4.3
- _____. Least squares fitting – polynomial. *MathWorld – A Wolfram Web Resource*, 2012b. Acesso realizado aos 31 de Julho de 2.012. Disponível em: <<http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFittingPolynomial.html>>. 4.3
- WESTMAN, E. *Calibration and Evaluation of the Exponential Effective SINR Mapping (EESM) in 802.16*. Dissertação (Mestrado) — Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia, Setembro 2006.
- WIDROW, B. Thinking about thinking: the discovery of the LMS algorithm. *Signal Processing Magazine, IEEE*, v. 22, n. 1, p. 100 – 106, Janeiro 2005. 4.4.1
- WIDROW, B.; LEHR, M. 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation. *Proceedings of the IEEE*, v. 78, n. 9, p. 1415 –1442, Setembro 1990. ISSN 0018-9219. (document), 4.17, 4.4.1
- WINSBERG, E. Simulations, models, and theories: Complex physical systems and their representations. *Philosophy of Science*, v. 68, n. 3, Setembro 2001. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/3080964>>. 4.1
- WRULICH, M.; RUPP, M. Computationally efficient MIMO HSDPA system-level modeling. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2009, 2009. ISSN 1687-1472. Article ID 382501.
- WU, T.-Y.; WENG, W.-F. Reducing handoff delay of wireless access in vehicular environments by artificial neural network-based geographical fingerprint. *Communications, IET*, v. 5, n. 4, p. 542–553, 2011. ISSN 17518628.

- XIANG, Z.-J.; BI, G.-G. A new lattice polynomial perceptron and its applications to frequency-selective fading channel equalization and ACI suppression. *Communications, IEEE Transactions on*, v. 44, n. 7, p. 761–767, 1996.
- YAO, K. Error probability of asynchronous spread spectrum multiple access communication systems. *Communications, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 8, p. 803–809, Agosto 1977. ISSN 0090-6778. 4.1.2
- YOO, T.; GOLDSMITH, A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 24, n. 3, p. 528–541. 3.1.1, 1, 3.1.1
- YUN, S.; CARAMANIS, C. Reinforcement Learning for Link Adaptation in MIMO-OFDM Wireless Systems. In: *Globecom, IEEE*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. ISBN 9781424456383.
- ZANDER, J.; KIM, S.-L.; ALMGREN, M.; QUESETH, O. *Radio Resource Management for Wireless Networks*. [S.l.]: Artech House Publishers, 2001. ISBN 1580531466. 3.5.1
- ZHANG, R.; HANZO, L. Joint and distributed linear precoding for centralised and decentralised multicell processing. In: *IEEE Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1 – 5. ISSN 1090-3038. 3.1
- ZOBRIST, G. W.; LEONARD, J. V. (Ed.). *Object-oriented simulation: reusability, adaptability, maintainability*. Nova Iorque, E.U.A.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1996. ISBN 0-7803-1061-6. 4.1
- ZOOGHBY, A. H. E.; CHRISTODOULOU, C. G.; GEORGIOPOULOS, M. Performance of radial-basis function networks for direction of arrival estimation with antenna arrays. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 45, n. 11, p. 1611–1617, 1997.
- _____. Neural network-based adaptive beamforming for one-and two-dimensional antenna arrays. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 46, n. 12, p. 1891–1893, 1998.