

Contribuições à análise de
desempenho de protocolos de
múltiplo acesso em sistemas de
rádios cognitivos

Afonso José de Faria

Fevereiro/2014

CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PROTOCOLOS DE MÚLTIPLO ACESSO EM SISTEMAS DE RÁDIOS COGNITIVOS

AFONSO JOSÉ DE FARIA

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações,
como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em
Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

Santa Rita do Sapucaí
2014

Faria, Afonso José de

Contribuições à análise de desempenho de protocolos de múltiplo acesso em sistemas de rádios cognitivos /Afonso José de Faria. – Santa Rita do Sapucaí, 2014.

183p.

Orientador: Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito
Dissertação de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia e anexo.

1. Rádio Cognitivo. 2. Múltiplo Acesso. 3. Análise de desempenho. I. Brito, José Marcos Câmara. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em ____ / ____ / ____ ,
pela comissão julgadora:

Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito (Orientador)/INATEL

Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti/INATEL

Prof. Dr. Fernando José de Almeida Andrade/UFJF

Coordenador do Curso de Mestrado
Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

Aos meus pais, Sebastião e Maria José,
exemplos de vida.

À minha esposa, Eunice e ao meu filho,
Felipe, que Deus nos ilumine e proteja.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por ter permitido chegar até aqui.

Ao Instituto Nacional de Telecomunicações pela oportunidade de fazer o curso de mestrado.

Ao Professor José Marcos Câmara Brito pela valiosa orientação, pelo apoio e pelas apresentações de nossos trabalhos.

Aos Professores Dr. Luciano Leonel Mendes e Dr. Dayan Adionel Guimarães pela confiança depositada. Agradeço também aos Professores Dr. Antônio Marcos Alberti, Dr. Carlos Alberto Ynoguti pelo importante conteúdo acadêmico que enriquece este trabalho.

À Sra. Gisele Moreira dos Santos, pela presteza e atenção.

Aos colegas de mestrado pela ajuda, pela troca de conhecimento e amizade.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
Capítulo 1 - Introdução	2
1.1. Contextualização	2
1.2. Rádio Cognitivo	4
1.3. Objetivo e motivação.....	8
1.4. Estrutura e contribuições da dissertação	11
1.5. Publicações	12
Capítulo 2 - Fundamentos teóricos e cálculo da taxa média de erros de pacotes	14
2.1. Introdução.....	14
2.2. Análise da propagação do sinal em canal sem fios	16
2.2.1. Desvanecimento de Rayleigh	17
2.3. Ruído e interferência em sistemas de comunicação	19
2.3.1. Relação sinal-ruído.....	19
2.3.2. Interferência	20
2.3.3. Relação sinal-interferência.....	21
2.4. Efeito de captura.....	21
2.5. Taxa média de erros de pacotes.....	23
2.5.1. Revisão bibliográfica.....	24
2.5.2. Cálculo da PER através de limitante superior geral	28
2.6. Protocolos de múltiplo acesso	31
2.6.1. Classificação dos protocolos de múltiplo acesso	33
2.6.2. Análise dos protocolos MAC	36
2.6.3. Métricas de desempenho dos protocolos MAC.....	38
2.6.4. Protocolo <i>Slotted Aloha</i> e CSMA.....	39
Capítulo 3 - Análise de desempenho de redes de rádios cognitivos usando <i>Slotted Aloha</i>	41
3.1. Introdução.....	41
3.2. Modelo original de sistema	43
3.2.1. Arquitetura do modelo original	44
3.2.2. Modelo de tráfego para a rede primária e secundária	44
3.2.3. Desvanecimento no canal	47
3.2.4. Efeito de captura.....	48
3.2.5. Probabilidades de captura.....	48
3.2.6. Cálculo das vazões para o modelo original	51
3.2.7. Cálculo do atraso médio para o modelo original.....	56
3.3. Novo modelo de sistema	59
3.3.1. Cálculo da relação sinal-interferência	61
3.3.2. Taxa média de erro de pacotes no novo modelo	63
3.3.3. Cálculo da vazão para o novo modelo	66

3.3.4. Atraso médio para o novo modelo	68
3.4. Resultados numéricos.....	70
3.5. Conclusão	74
Capítulo 4 - Análise de desempenho de redes de rádios cognitivos usando <i>Slotted CSMA</i>	76
4.1. Introdução.....	76
4.2. Modelo original	77
4.3. Análise do desempenho da rede primária para o modelo original.....	79
4.3.1. Análise do desvanecimento na rede primária.....	79
4.3.2. Efeito de captura da rede primária	80
4.3.3. Cálculo da vazão da rede primária para o modelo original	81
4.3.4. Cálculo do atraso médio da rede primária para o modelo original	84
4.4. Análise do desempenho para a rede secundária no modelo original.....	86
4.4.1. Estrutura de <i>mini-slots</i>	86
4.4.2. Modelo de tráfego para a rede secundária.....	88
4.4.3. Modelo de desvanecimento para a rede secundária	89
4.4.4. Efeito de captura da rede secundária.....	90
4.4.5. Cálculo da vazão da rede secundária para o modelo original	92
4.4.6. Cálculo do atraso médio da rede secundária no modelo original	98
4.5. Análise da vazão global das redes no modelo original	99
4.6. Novo modelo de sistema	100
4.6.1. Cálculo da relação sinal-interferência	100
4.6.2. Taxa média de erros de pacotes.....	103
4.7. Análise do desempenho da rede primária para o novo modelo	103
4.7.1. Cálculo da vazão da rede primária para o novo modelo	103
4.7.2. Cálculo do atraso médio da rede primária para o novo modelo	104
4.8. Análise do desempenho da rede secundária para o novo modelo	106
4.8.1. Cálculo da vazão da rede secundária para o novo modelo	106
4.9. Cálculo da vazão global para o novo modelo.....	107
4.10. Resultado numérico para a análise de vazão das redes	107
4.11. Resultado numérico para o atraso médio da rede primária	109
4.12. Método para cálculo do atraso médio da rede secundária.....	110
4.12.1. Estrutura de <i>mini-slots</i> para cálculo do atraso médio da rede secundária	111
4.12.2. Modelo de tráfego para cálculo do atraso médio da rede secundária	112
4.12.3. Modelo de desvanecimento da rede secundária para o cálculo do atraso médio.....	113

4.12.4. Efeito de captura da rede secundária para o cálculo do atraso médio	114
4.12.5. Cálculo da SIR da rede secundária para o cálculo do atraso médio	114
4.12.6. Cálculo da PER da rede secundária para o cálculo do atraso médio	115
4.12.7. Probabilidade de geração de novos pacotes	115
4.12.8. Diagrama em árvore para a rede secundária	117
4.12.9. Cálculo das probabilidades de geração de pacotes e sucesso na transmissão	122
4.12.10. Cálculo das probabilidades de atraso de acesso na rede secundária	127
4.12.11. Cálculo do atraso médio para a rede secundária sem considerar a PER	133
4.12.12. Cálculo do atraso médio da rede secundária considerando a PER	133
4.13. Resultado numérico e simulação para o atraso médio da rede secundária	134
4.14. Conclusão	137
Capítulo 5 - Conclusões e estudos futuros	139
5.1. Contribuições desse trabalho	140
5.2. Publicações	140
5.3. Propostas de trabalho futuro	141
Anexo A – Dedução da probabilidade de captura para a rede primária	142
Anexo B – Dedução da probabilidade de captura para a rede secundária	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146
Apêndice I – Diagrama de fluxo de dados para a Simulação para o atraso médio da rede secundária com protocolo CSMA	154
Apêndice II – Programa fonte para a Simulação para o atraso médio da rede secundária com protocolo CSMA	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – <i>Conceito de oportunidade espectral.</i>	4
Figura 1.2 – <i>Arquitetura de uma rede de rádios cognitivos.</i>	6
Figura 2.1 – <i>Propagação multipercurso.</i>	17
Figura 2.2 – <i>Arquitetura de redes com presença de interferência no receptor A.</i>	21
Figura 3.1 – <i>Arquitetura para o modelo original de sistema.</i>	45
Figura 3.2 – <i>Modelo de tráfego para o protocolo Slotted Aloha.</i>	46
Figura 3.3 – <i>Cálculo da probabilidade $P_{op}(K=k)$, para $k=1, 2, 3$ e 4.</i>	58
Figura 3.4 – <i>Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original ($N_p=N_s=30, \gamma=10, R=3dB$).</i>	72
Figura 3.5 – <i>Vazão da rede secundária: comparação entre os modelos novo e original ($N_p=N_s=30, \gamma=10, R=3dB$).</i>	72
Figura 3.6 – <i>Vazão global das redes: comparação entre os modelos novo e original ($N_p=N_s=30, \gamma=10, R=3dB$).</i>	73
Figura 3.7 – <i>Atraso médio: comparação entre os modelos novo e original ($N_p=N_s=30, \gamma=10, R=3dB, m=1, 2$).</i>	73
Figura 3.8 – <i>Atraso médio: comparação entre os modelos novo e original ($N_p=N_s=30, \gamma=10, R=3dB, m=1, 5$).</i>	74
Figura 4.1 – <i>Arquitetura das redes para o modelo original.</i>	78
Figura 4.2 – <i>Estrutura de time slot para o modelo original.</i>	78
Figura 4.3 – <i>Estrutura de time slot da rede primária e de mini-slots da rede secundária.</i>	87
Figura 4.4 – <i>Modelo de tráfego para a rede secundária com Slotted CSMA.</i>	89
Figura 4.5 – <i>Estudo de casos de uso e detecção de mini-slots livres na rede secundária.</i>	96
Figura 4.6 – <i>Vazão da rede secundária ($N_p=20, N_s=10, 20, 30, S_{mi}=10, T_{mi}=100, R=3 dB$).</i>	108
Figura 4.7 – <i>Vazão da rede primária ($N_p=20, R=3 dB$).</i>	108
Figura 4.8 – <i>Vazão global das redes ($N_p=20, N_s=10, 20, 30, S_{mi}=10, T_{mi}=100, R=3 dB$).</i>	109
Figura 4.9 – <i>Atraso médio da rede primária ($N_p=10, 20, 30, R=3 dB, \sigma_p=G/N_p$).</i>	110
Figura 4.10 – <i>Nova estrutura de mini-slots da rede secundária.</i>	112
Figura 4.11 – <i>Novo modelo de tráfego para a rede secundária com Slotted CSMA.</i>	113
Figura 4.12 – <i>Sequência temporal de mini-slots.</i>	115
Figura 4.13 – <i>Diagrama em árvore para a probabilidade $P(N=0)$.</i>	119
Figura 4.14 – <i>Diagrama em árvore para a probabilidade $P(N=1)$.</i>	120
Figura 4.15 – <i>Diagrama em árvore para a probabilidade $P(N=2)$.</i>	121
Figura 4.16 – <i>Diagrama em árvore para cálculo das probabilidade de falha de transmissão.</i>	124
Figura 4.17 – <i>Diagrama em árvore para cálculo da probabilidade de falha (P_{FT}), considerando $S_{mi}=3$.</i>	126
Figura 4.18 – <i>Sequência de time slots e valores possíveis para o atraso de acesso.</i>	127

Figura 4.19 – Diagrama de árvore para probabilidade $P(N=9)$	129
Figura 4.20 – Distância entre transmissão e geração de pacote.	130
Figura 4.21 – Atraso médio da rede secundária ($N_p=20, N_s=10, 20, 30, R=3$ $dB, S_{mi}=3, T_{mi}=4, \sigma_p=\sigma_{mi}$).	135
Figura 4.22 – Atraso médio da rede secundária ($N_p=20, N_s=10, 20, 30, R=3$ $dB, S_{mi}=10, T_{mi}=100$).	136
Figura 4.23 – Atraso médio da rede secundária ($R=3 dB, S_{mi}=3, T_{mi}=4,$ $w_0=3,4467$).	136
Figura I.1 – Diagrama de fluxo de dados para o laço principal da simulação.	154
Figura I.2 – Diagrama de fluxo de dados para a função de tratamento de tráfego nas redes.	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - <i>Valores de w_0 para modulação BPSK coerente</i>	66
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	<i>Positive Acknowledgement</i>
AOD	<i>Average Outage Duration</i>
AT&T	<i>American Telephone & Telegraph</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase-shift Keying</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
C-MAC	<i>Cognitive MAC (Medium Access Control)</i>
CR	<i>Cognitive Radio</i>
CRN	<i>Cognitive Radio Network</i>
CSA	<i>Concurrent Spectrum Access</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
DCA-MAC	<i>Dynamic Channel Assignment MAC</i>
DOSS	<i>Dynamic Open Spectrum Sharing MAC</i>
DSA	<i>Dynamic Spectrum Access</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
GE	<i>Gilbert-Elliott</i>
HC-MAC	<i>Hardware-Constrained Cognitive MAC</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical - banda de frequências</i>
ISORA	<i>Isotropic Scattering Omnidirectional Receiving Antenna</i>
ITMA	<i>Interference Temperature Multiple Access</i>
LCR	<i>Level Crossing Rate</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
M-QAM	<i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i>
NAK	<i>Negative Acknowledgement</i>
OSA	<i>Opportunistic Spectrum Access</i>
OS-MAC	<i>Opportunistic Spectrum MAC</i>
PAP	<i>Ponto de Acesso Primário</i>
PAS	<i>Ponto de Acesso Secundário</i>

PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PED	<i>Packet Error Distribution</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
POMDP	<i>Partially Observed Markov Process</i>
PRMA	<i>Packet Reservation Multiple Access</i>
PSR	<i>Packet Success Rate</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RF	Radiofrequência
ROSA	<i>Routing and Spectrum Allocation</i>
SER	<i>Symbol Error Rate</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SIR	<i>Signal-to-Interference Ratio</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPTF	<i>Spectrum Policy Task Force</i>
SRAC-MAC	<i>Single-Radio Adaptive Channel MAC</i>
SYN-MAC	<i>Synchronized MAC</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UP	Usuário Primário
US	Usuário Secundário
VA	Variável Aleatória
xG	Redes de próxima geração
USI	Usuário Secundário de Interesse
TSGP	<i>Time Slot</i> de Geração de Pacote

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Início do intervalo $[a, b]$
b	Fim do intervalo $[a, b]$
$b(\delta)$	Taxa de erro de <i>bits</i> (BER) para o canal AWGN
D_{np}	Atraso médio de acesso normalizado em termos de <i>time-slots</i> para a rede primária, segundo o novo modelo
D_{ns}	Atraso médio de acesso normalizado em termos de <i>time-slots</i> para a rede primária, segundo o novo modelo
D_{op}	Atraso médio de acesso normalizado da rede primária segundo o modelo original
D_{os}	Atraso médio de acesso normalizado da rede secundária segundo o modelo original
D_{sc}	Indica o atraso médio de acesso da rede secundária, em termos de <i>mini-slots</i> , quando se considera apenas o efeito de captura no modelo
D_{scp}	Denota o atraso médio de acesso da rede secundária, em termos de <i>mini-slots</i> , quando se considera efeito de captura e a taxa média de erros de pacotes no modelo
E	Evento onde tanto o ponto de acesso da rede primária, quanto o da rede secundária, são <i>capturados</i> pelos usuários primário e secundário, respectivamente
$E[.]$	Valor esperado de $[.]$
E_p	Evento onde apenas o usuário primário <i>captura</i> o seu ponto de acesso.
E_{pp}	Para uma rede com N_p usuários, é a quantidade de enlaces ponto a ponto requerida para conexão de todas as estações
E_s	Evento no qual somente o usuário secundário <i>captura</i> o seu ponto de acesso
$f(x)$	Limitante, não negativo e integrável no intervalo $[a, b]$
$f(\delta)$	Função que relaciona a PER com a SNR instantânea em um canal com ruído AWGN
$f_N(n)$	Denota a função massa de probabilidade da variável aleatória N
$f_X(x)$	Função de distribuição de probabilidade da variável aleatória (VA) X
$f_Y(y)$	Função de distribuição de probabilidade da VA Y
G	Carga da rede primária
$g(t)$	Envelope complexo do sinal recebido

$g(x)$	Função monotonicamente decrescente
$g(\delta)$	Função de distribuição de probabilidade da SNR instantânea recebida
$g'(x)$	Função diferencial de Y em relação a X (dY/dX)
G_6	Indica que o pacote de interesse é gerado no <i>mini-slot</i> $s=6$
G_7	Indica que o pacote de interesse é gerado no <i>mini-slot</i> $s=7$
$g_I(t)$	Componente em fase do envelope complexo do sinal recebido
G_p	Carga da rede primária
$g_Q(t)$	Componente em fase do envelope complexo do sinal recebido
I_p	Número de usuários primários que estão tentando transmitir em dado instante ou número de estações primárias interferentes
J_s	Representa o número de usuários secundários que estão tentando transmitir no início de um dado <i>time slot</i> ou o número de usuários interferentes da rede secundária
K	Variável aleatória discreta que indica em qual <i>time slot</i> o pacote de interesse foi transmitido com sucesso
K_p	Variável aleatória discreta que define o número de <i>time slots</i> necessários para transmitir um pacote com sucesso na rede primária
K_s	Variável aleatória discreta que define o número de <i>time slots</i> necessários para transmitir um pacote com sucesso na rede secundária
L	Indica em qual <i>mini-slot</i> do período de detecção de portadora houve tentativa de transmissão de dados por um usuário secundário
L_{mi}	Representa o número de <i>mini-slots</i> contidos em um <i>time-slot</i> . (O mesmo que T)
L_{sup}	Limite superior de um somatório
m	Igual à razão (σ_s/σ_p) , sendo que σ_p e σ_s representam as probabilidades de geração de novos pacotes ou de retransmissão de pacotes em <i>buffer</i> para os usuários primários e secundários, respectivamente
M	Representa o número de símbolos da constelação
N_G	Valor da potência média do ruído Gaussiano branco aditivo
N	Variável aleatória discreta que representa o atraso de acesso da rede secundária, em <i>mini-slots</i> , quando o protocolo CSMA é usado
N_0	Densidade espectral do ruído AWGN
n_0	Ruído Gaussiano complexo com densidade espectral de potência igual a N_0
n_b	Número médio de <i>bits</i> de um pacotes de dados

N_e	Número de estados da cadeia de Markov
N_p	Número total de usuários da rede primária
N_s	Número total de estações da rede secundária
$P(Iptx)$	Probabilidade de que um ou mais usuários primários transmitam ao mesmo tempo
$P(itx)$	Probabilidade de que haja i usuários primários tentando transmitir em um dado <i>time slot</i>
$P(Jstx)$	Probabilidade de que um ou mais usuários secundários transmitam ao mesmo tempo
$P(jtx)$	Probabilidade de que se tenha j usuários secundários em tentativa de transmissão de seus pacotes de dados num dado <i>time slot</i>
$p(\delta)$	Função de densidade de probabilidade da SIR no receptor, com distribuição exponencial
$P_{ave}(\Delta)$	Valor da taxa média de erros de pacotes (PER)
P_{B1}	Probabilidade de que a rede primária esteja ocupada
P_{B2}	Probabilidade de que a rede secundária esteja ocupada
P_{cap}	Probabilidade de captura quando se considera o efeito de captura
$P_{cap}(L=l)$	Probabilidade de que um pacote transmitido no <i>mini-slot</i> ($L=l$) seja capturado pelo ponto de acesso secundário
$P_F(sm)$	É a probabilidade de falha quando a transmissão inicia no <i>mini-slot</i> sm
P_{FT}	Representa a probabilidade de que o usuário secundário de interesse não consiga transmitir o seu pacote com sucesso em nenhum <i>mini-slot</i> do período de detecção de portadora de um <i>time slot</i>
$P_G(s)$	Denota a probabilidade de geração de um novo pacote pelo usuário secundário de interesse no <i>mini-slot</i> $S=s$
$P_{GF}(s)$	Probabilidade condicional que representa a condição de que um pacote de interesse foi gerado em um <i>mini-slot</i> do período de detecção de portadora e não foi recebido corretamente, pois a rede está ocupada ou houve falha de transmissão.
P_{I1}	Probabilidade de que a rede primária esteja livre
P_{I2}	Probabilidade de que a rede secundária esteja livre
P_{idle}	Probabilidade de que a rede primária esteja ociosa. (O mesmo que P_{I1})
P_{interf}	Valor da potência média interferente total em um receptor
P_{ip}	Potência média interferente total na rede primária
P_{is}	Potência média interferente total na rede secundária

- $P_{mi_idle}(i)$ A probabilidade de que o *mini-slot* (i) do período de detecção de portadora não esteja em uso por nenhum usuário secundário
- P_{new} Probabilidade de que um usuário secundário gere um novo pacote no primeiro *mini-slot* do período de detecção de portadora.
- $P_{new}(S=s)$ Probabilidade de que um usuário secundário gere um novo pacote no *mini-slot* ($S=s$) de um dado *time slot* livre ou ocupado.
- P_{np} Probabilidade de que um usuário primário obtenha sucesso na transmissão de seu pacote no *time slot* seguinte à sua geração, considerando o novo modelo proposto e a arquitetura de rede que usa *Slotted Aloha* na rede primária e secundária
- $P_{np}(K=k)$ Probabilidade de que o pacote de interesse gerado por um usuário primário seja transmitido com sucesso no *time slot* $K=k$
- P_{ns} Probabilidade de que um usuário secundário obtenha sucesso na transmissão de seu pacote no *time slot* seguinte à sua geração, considerando o novo modelo proposto e a arquitetura de rede que usa *Slotted Aloha* na rede primária e secundária
- $P_{ns}(K=k)$ Probabilidade de que o pacote de interesse gerado por um usuário secundário seja transmitido com sucesso no *time slot* $K=k$
- P_{ntx} Probabilidade de que o usuário secundário de interesse não *escute* o meio durante um dado *mini-slot*
- P_{op} Probabilidade de que um usuário primário obtenha sucesso na transmissão de seu pacote no *time slot* seguinte à sua geração, considerando o modelo original e a arquitetura de rede que usa *Slotted Aloha* na rede primária e secundária
- $P_{op}(K=k)$ Probabilidade de que o pacote de interesse gerado por um usuário primário seja transmitido com sucesso no *time slot* $K=k$
- P_{os} Probabilidade de que um usuário secundário obtenha sucesso na transmissão de seu pacote no *time slot* seguinte à sua geração, considerando o modelo original e a arquitetura de rede que usa *Slotted Aloha* na rede primária e secundária
- $P_{os}(K=k)$ Probabilidade de que o pacote de interesse gerado por um usuário secundário seja transmitido com sucesso no *time slot* $K=k$
- $P_{pcap \rightarrow PAP}$ Probabilidade de que o sinal de interesse do usuário primário *capture* o ponto de acesso da rede primária
- $Pr(.)$ Probabilidade de ocorrência do evento ($.$)
- $p_R(r)$ Função de distribuição de probabilidade da amplitude r , segundo a distribuição de Rayleigh.
- $P_{ruído}$ Valor da potência média do ruído Gaussiano branco aditivo
- P_s Probabilidade de sucesso quando se considera apenas o efeito de captura

$P_s(sm)$	Representa a probabilidade de que o sinal do pacote de interesse seja transmitido com sucesso para o ponto de acesso secundário a partir do <i>mini-slot</i> sm
$P_{scap \rightarrow PAS}$	Probabilidade de que o sinal de interesse do usuário secundário <i>capture</i> o ponto de acesso da rede secundária
P_{sinal}	Valor da potência média do sinal que transporta informação
$P_{SN}(sm)$	Probabilidade condicional de que, em um mesmo <i>time slot</i> livre, o usuário secundário de interesse não <i>escute</i> algum ou alguns <i>mini-slots</i> do período de detecção de portadora, mas ele consegue transmitir com sucesso a partir de um determinado <i>mini-slot</i> desse <i>time slot</i>
$PSR(\Delta)$	Valor médio da taxa de sucesso de transmissão de pacotes em função do valor médio da SIR (Δ)
P_{suc}	Probabilidade de sucesso quando se considera o efeito de captura e o <i>mini-slot</i> em que a transmissão iniciou
P_{suc_new}	Representa a probabilidade de sucesso na quando o efeito de captura e a taxa média de erros de pacotes são considerados no cálculo
P_{sym}	Probabilidade de erro de símbolo
P_{tx}	Probabilidade de que o usuário secundário de interesse <i>escute</i> o meio durante um dado <i>mini-slot</i>
$p_x(x_p)$	Função de distribuição de probabilidade da potência instantânea x_p
$p_x(x_s)$	Função de distribuição de probabilidade da potência instantânea, x_s , do sinal de interesse de um usuário da rede secundária
$p_{y_i}(y_i)$	Função de distribuição de probabilidade da potência instantânea, y_i , do sinal interferente de um usuário primário
$p_{z_j}(z_j)$	Função de distribuição de probabilidade da potência instantânea, z_j , do sinal interferente de um usuário primário
r	Amplitude do envelope complexo do sinal recebido
R	Razão de captura
S_i	Valor da potência média do sinal que transporta informação
S	Variável aleatória discreta que indica em qual <i>mini-slot</i> da rede secundária o pacote de interesse foi gerado
S_1	Indica que o pacote de interesse é transmitido com sucesso no <i>mini-slot</i> $sm=1$
S_2	Indica que o pacote de interesse é transmitido com sucesso no <i>mini-slot</i> $sm=2$
$SINR$	Valor médio adimensional da relação sinal-interferência mais ruído
SIR	Valor médio da relação sinal-interferência

S_{mi}	Período para detecção de portadora, medido em unidades de <i>mini-slots</i> , usado pelos usuários da rede secundária quando o protocolo usado é o CSMA.
S_{np}	Vazão da rede primária segundo o novo modelo proposto
SNR	Valor médio adimensional da relação sinal-ruído
SNR_{dB}	Valor médio da relação sinal-ruído em Decibéis (dB)
S_{ns}	Vazão da rede secundária de acordo com o novo modelo
S_{nt}	Vazão global das redes primária e secundária do sistema de comunicação sem fios do novo modelo
S_{op}	Vazão da rede primária, segundo o modelo original
S_{os}	Vazão da rede secundária, segundo modelo original
S_{ot}	Vazão global das redes primária e secundária, conforme modelo original
T	Representa o número total de <i>mini-slots</i> contidos em um <i>time slot</i>
T_{ij}	Considerado um evento onde há I_p usuários primários e J_s usuários secundários disputando um dado <i>time slot</i>
T_{I_p}	Evento onde há I_p usuários primários disputando um dado <i>time slot</i>
T_{J_s}	Evento onde há J_s usuários secundários disputando um dado <i>time slot</i>
T_{mi}	Duração de um pacote de dados da rede secundária em <i>mini-slots</i>
U_{mi}	Fator de utilização de um <i>time slot</i> pelos usuários secundários, considerando que alguns <i>mini-slots</i> são reservados para <i>escutar</i> o meio
w_0	Valor constante e igual ao resultado da integração de $f(x)$ no intervalo $[a, b]$
X	Variável aleatória
x_p	Valor instantâneo de uma potência do sinal de interesse recebido na rede primária ou rede existente
X_p	Valor médio da potência do sinal de interesse, x_p , da rede primária ou rede existente
x_s	Potência instantânea do sinal recebido de um pacote de interesse da rede secundária
X_s	Valor médio da potência do sinal recebido de um pacote de interesse da rede secundária
y	A amplitude de um sinal recebido
Y	Valor médio da potência do sinal de uma estação da rede primária considerada interferente
Y_i	Valor da potência média interferente de um usuário primário

y_i	Valor instantâneo recebido do sinal de uma estação interferente da rede primária
Z	Valor médio da potência do sinal de uma estação da rede secundária considerada interferente
Z_j	Valor da potência média interferente de um usuário secundário
z_j	Valor instantâneo recebido do sinal de uma estação interferente da rede secundária
α	Coefficiente de desvanecimento instantâneo do canal ou ganho do canal
γ	Razão entre a potência média do sinal de interesse praticada na rede primária e a potência média praticada por uma estação interferente na rede secundária
δ	Valor instantâneo da relação sinal-interferência no receptor
Δ	Valor médio da relação sinal-interferência no receptor
Δ_p	Valor médio da relação sinal-interferência na rede primária
Δ_s	Valor médio da relação sinal-interferência na rede secundária
ξ	Representa um símbolo em um sistema de comunicação
σ	Probabilidade de geração de um novo pacote ou de sua retransmissão
σ_{mi}	Probabilidade de que um usuário da rede secundária, que usa o protocolo CSMA, gere um novo pacote ou <i>escute</i> o meio quando possui pacote de dados em seu <i>buffer</i> para ser transmitido
σ_p	Probabilidade de geração de um novo pacote por um usuário primário ou de retransmissão de um pacote por algum usuário desta rede, quando se considera o protocolo <i>Slotted Aloha</i>
σ_s	Probabilidade de geração de um novo pacote por um usuário secundário ou de retransmissão de um pacote por algum usuário desta rede, quando se considera o protocolo <i>Slotted Aloha</i>
τ	Atraso máximo de propagação nas redes de comunicação sem fios da arquitetura em análise
Ω	Segundo momento de r

RESUMO

Rádio cognitivo é um novo conceito no desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fios que permite o uso mais eficiente do espectro e é, portanto, forte candidato como solução tecnológica para as redes sem fios do futuro, onde o espectro seria acessado de maneira oportunista. Nesses sistemas, os protocolos de múltiplo acesso têm grande impacto no desempenho das redes de comunicação sem fios, sendo responsáveis por organizar o acesso ao meio dos diferentes tipos de usuários e evitar ou tornar a interferência tolerável para os usuários primários. Neste trabalho, analisa-se o desempenho, em termos de vazão e atraso médio de acesso, de uma rede de rádios cognitivos que utiliza os protocolos *Slotted Aloha* e *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA). No estudo realizado, os resultados previamente apresentados na literatura são estendidos de modo a considerar os impactos do efeito de captura e da taxa média de erros de pacotes – *Packet Error Rate* (PER) sobre o desempenho dessa rede. Por fim, propõe-se aqui um novo modelo para calcular o atraso médio para a rede secundária quando o protocolo CSMA é utilizado.

Palavras chave - Rádio cognitivo, múltiplo acesso, vazão, atraso médio, análise de desempenho.

ABSTRACT

Cognitive Radio is a new concept in the development of wireless communication systems, enabling a more efficient use of radio spectrum and, therefore, it is a strong candidate as a technological solution for the future wireless networks by exploiting the frequency bands in an opportunistic fashion. In this environment, multiple access protocols have great impact on the performance of wireless communication networks and they play an important role in organizing different kinds of users to effectively access broadcast channels and avoid or make the interference acceptable in the primary network. In this work, we are able to analyze cognitive radios network performance in terms of throughput and average delay, considering Slotted Aloha and Carrier Sense Multiple Access (CSMA) protocols. In this study, the results that are presented previously in the literature are extended in order to consider the impacts of the capture effect and packet error rate on the networks performance. Finally, a new model is proposed to calculate the average delay for the cognitive radios network when the CSMA protocol is used.

Keywords - Cognitive radio, multiple access, throughput, average delay, performance analysis.

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

O espectro de radiofrequências é fatiado em bandas espectrais caracterizadas por uma destinação ou aplicação, uma frequência central, uma largura de faixa e uma região geográfica [1]. As concessões dessas bandas são geralmente gerenciadas por órgãos governamentais e licenciadas para determinados usuários para uso exclusivo e inflexível em contratos de concessão de longo prazo [1] [2].

Estudos mostram que determinadas bandas de frequência, alocadas nesse esquema, são raramente usadas, ou até mesmo não utilizadas, em determinados horários e/ou regiões geográficas, enquanto que outras estão congestionadas [1] [2] [3] [4] [5].

Por outro lado, observa-se um aumento na demanda por dispositivos, aplicações e serviços que fazem uso do espectro de frequências, tanto no espectro licenciado, quanto no não licenciado, como ocorre, por exemplo, com a banda destinada às aplicações industriais, científicas e médicas - *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) [6]. Esse aumento (na demanda) é impulsionado (1) pelo rápido crescimento da economia ligada ao setor de serviços de comunicações; (2) pelo fato das pessoas estarem se deslocando cada vez mais e necessitarem estar conectadas; e (3) há um grande número de lançamentos de dispositivos móveis, portáteis, com comunicação sem fios e com preços acessíveis [7].

De acordo com [4], o espectro eletromagnético de rádio é um precioso recurso natural e, em muitas bandas, o acesso espectral é um problema maior do que

a escassez física de espectro, em grande parte causada pelo atual esquema de alocação fixa que torna baixa a eficiência de utilização desse recurso.

Para atender a demanda por espectro para os serviços e aplicações emergentes em redes sem fios, é necessária uma alteração da política de gerenciamento do espectro, permitindo a flexibilidade de uso do espectro, suportando e encorajando o seu uso eficiente e observando os aspectos técnicos, econômicos e sociais [1] [2] [3] [4].

O gerenciamento espectral flexível, dinâmico e eficiente abre novas oportunidades para que diferentes tecnologias sem fios usem o espectro de frequência de maneira mais eficiente [1] [2] [8].

O relatório do *Spectrum Policy Task Force* (SPTF), ligado ao *Federal Communications Commission* (FCC), traz como um resultado o fato de que é importante evoluir as políticas atuais de uso e gerenciamento do espectro em direção a uma outra que reflita o uso dinâmico e inovador do espectro [7].

Técnicas de acesso dinâmico ao espectro foram propostas para resolver esse problema de ineficiência no uso do espectro, por meio da capacidade de compartilhamento do canal sem fios com os usuários licenciados de maneira oportunista [2] [8]. A Figura 1.1 ilustra o conceito de oportunidade espectral.

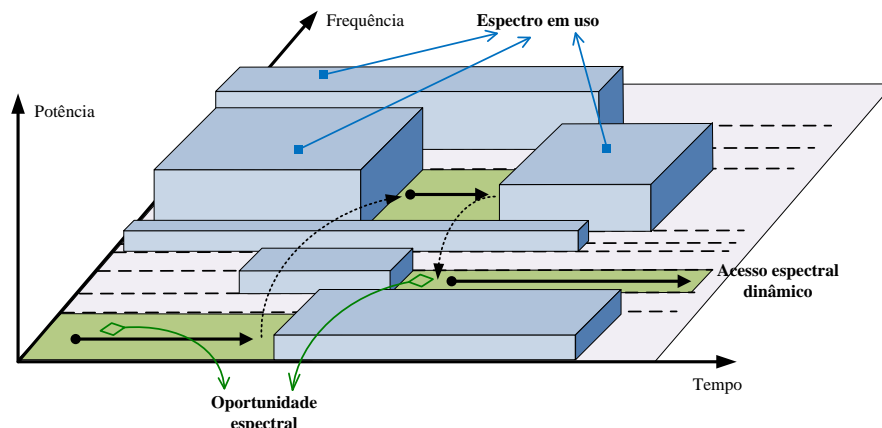


Figura 1.1 – *Conceito de oportunidade espectral.*

Conforme [4], se for realizada uma varredura do espectro de rádio, seriam encontradas algumas bandas do espectro pouco ocupadas na maioria do tempo e outras parcialmente ocupadas. Isso leva a pensar em oportunidades ou buracos espectrais, também chamados de espaços brancos, definidos como uma banda de frequência licenciada para um dado usuário, mas que, em determinados horários e em determinadas localizações geográficas, não está sendo usada pelo usuário licenciado. A utilização do espectro pode ser melhorada significativamente quando é permitido que um usuário não licenciado acesse o buraco espectral nos horários e na localização em questão.

Para explorar estas oportunidades, os transceptores sem fios necessitam ser mais inteligentes no acesso ao espectro de rádio [1]. A tecnologia de rádio cognitivo – *Cognitive Radio* (CR) é forte candidata como solução tecnológica para as chamadas redes sem fios de próxima geração [2] [3], uma vez que o CR poderia ser usado para explorar os buracos espectrais existentes, sem causar interferência prejudicial aos usuários licenciados para uso exclusivo de determinada banda em uma dada região geográfica [4].

1.2. Rádio Cognitivo

O rádio cognitivo foi inicialmente definido por Joseph Mitola III, em 1999. Uma rede com rádios cognitivos é aquela em que os *Personal Digital Assistants*

(PDAs) sem fios e as redes relacionadas são computacionalmente inteligentes sobre os recursos de rádio e sobre as comunicações entre computadores para [9]:

- a) detectar as necessidades de comunicação dos usuários como uma função do contexto de uso; e
- b) fornecer os recursos de rádio e serviços sem fios mais adequados para estas necessidades.

A definição original dada anteriormente foi adaptada e alterada por outros autores, como pode ser observado a seguir.

Em [4], rádio cognitivo é definido como um sistema de comunicação sem fios inteligente que é consciente do ambiente a sua volta e usa a metodologia de compreensão pela construção para aprender sobre o ambiente e adaptar seus estados internos às variações estatísticas dos estímulos de RF recebidos pela realização das correspondentes alterações em certos parâmetros de operação (por exemplo, potência de transmissão, frequência de portadora e estratégia de modulação) em tempo real, tendo dois objetivos principais: (1) comunicações altamente confiáveis quando e onde necessário e (2), utilização eficiente do espectro de rádio.

Em [10], define-se que CR é um rádio que pode alterar seus parâmetros de transmissão baseado na interação com o ambiente em que ele opera.

Os rádios cognitivos devem ser capazes de operar em ambientes de rádios complexos que podem ser caracterizados pelas facilidades: (1) multibanda; (2) multicanal; (3) multimodo; (4) multipadrão; e (5) multisserviço [11]. A detecção espectral, análise espectral, acesso espectral e mobilidade espectral são as principais funções do CR para suportar o acesso espectral dinâmico [12].

Rede de rádios cognitivos - *Cognitive Radio Network* (CRN) é uma rede que é capaz de estabelecer as conexões entre os seus nós de rádios cognitivos e ajustar

seus parâmetros de conectividade para se adaptar às mudanças no ambiente, topologia, condições de funcionamento, ou às necessidades dos usuários [13].

Em uma CRN os rádios cognitivos devem ser capazes de: (1) determinar quais porções do espectro estão disponíveis; (2) selecionar o melhor canal; (3) coordenar o acesso nesse canal com os outros usuários; (4) liberar o canal quando um usuário licenciado for detectado; (5) selecionar dinamicamente a rota para o destino e fazer as adaptações dinâmicas necessárias; (6) adaptar corretamente seus parâmetros de operação ao ambiente de rádio; (7) não perturbar as comunicações dos usuários primários e (8) fornecer medidas de segurança [2] [11].

Em ambientes de rádio cognitivo podem coexistir dois tipos de redes, dependendo do esquema de alocação do espectro de frequências adotado para a faixa de frequências de operação em análise: rede primária ou licenciada e rede secundária ou cognitiva. A Figura 1.2 mostra uma arquitetura de CRN. Nesse ambiente de rádio cognitivo, a rede secundária acessa o espectro de frequência quando ele não é usado pelos usuários da rede primária, para realizar as suas transmissões de dados [1] [14].

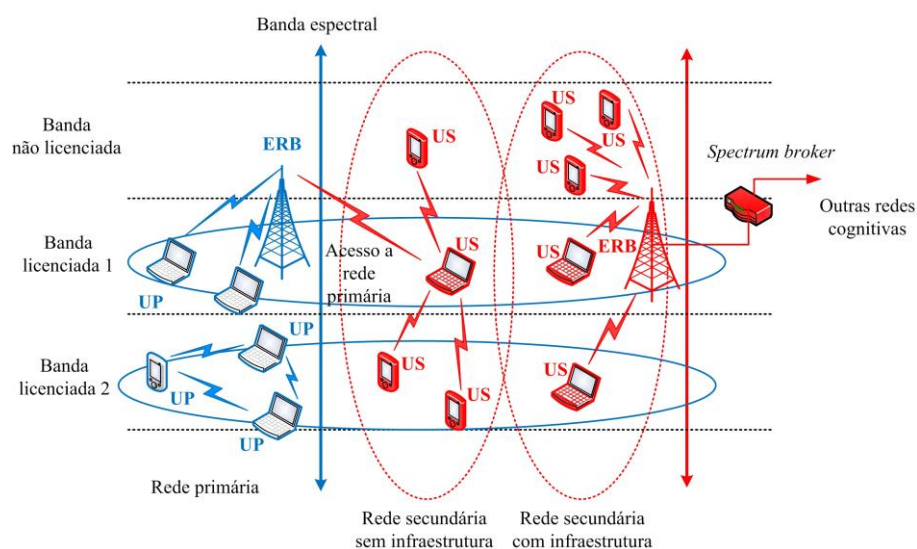


Figura 1.2 – Arquitetura de uma rede de rádios cognitivos.

A rede primária é a rede já existente e em operação e onde os seus usuários primários (UP) são licenciados para operar em uma dada banda do espectro e em uma dada região. Os UPs têm prioridade no acesso do espectro e suas operações não podem ser afetadas ou prejudicadas pelos usuários não licenciados [2]. Os sistemas legados de comunicações com seus usuários primários foram projetados para operar numa banda dedicada de frequências e não são capazes de aproveitar da flexibilidade permitida no novo modelo de acesso dinâmico ao espectro - *Dynamic Spectrum Access* (DSA) [1].

Na rede secundária, os usuários secundários (US) não têm licença para operar na banda desejada. Desta forma, eles monitoram o ambiente de rádio e acessam o canal de maneira oportunista [2].

Em uma CRN, o rádio cognitivo permite que os USs usem o espectro ocioso temporariamente. Por outro lado, nesta condição, se o usuário primário começar a usar novamente o espectro, o US deve abandonar a oportunidade e se mover para outro buraco espectral disponível e continuar a transmissão. Essa mudança deve ser feita rapidamente, de maneira que não ocorram cortes na comunicação e em sincronismo com o receptor [6] [11].

Um CR é projetado para estar ciente e sensível às variações em seu ambiente de operação, o que torna a detecção espectral uma importante função para a realização da CRN. Com esta função, um CR é capaz de detectar sinais primários em tempo real e em um amplo espectro de frequências [2].

No caso da função de decisão espectral, depois que as bandas espectrais disponíveis são caracterizadas, o CR deve escolher a porção mais apropriada do espectro, considerando os requisitos de QoS e as características espectrais [2].

A função de mobilidade espectral é chamada quando o US tem que mudar de canal de comunicação devido às mudanças nas condições de operações, como degeneração das condições do canal ou pela presença de usuário licenciado [11].

A função de compartilhamento espectral refere-se à resolução dos diversos conflitos que podem ocorrer nas CRNs, como quando muitos USs necessitam compartilhar o espectro disponível em um dado momento [11]. Para compartilhar o uso do canal sem fios é necessária uma coordenação das tentativas de transmissão feitas pelos USs. Nesse respeito, esta função de compartilhamento espectral deve incluir muito das funcionalidades dos protocolos de controle de acesso ao meio – *Medium Access Control* (MAC) e podem ser classificados segundo os aspectos: (1) arquitetura; (2) comportamento da alocação; (3) técnica de acesso ao espectro; e (4) escopo [2].

1.3. Objetivo e motivação

Os protocolos MAC para redes de rádios cognitivos devem identificar o recurso espectral disponível através da detecção espectral, decidir os tempos de detecção e transmissão ótimos e coordenar o acesso ao meio com os outros usuários secundários [15]. Eles devem ainda obter a máxima utilização do espectro pela detecção das oportunidades espectrais e acessar esse recurso de modo que as colisões com os UPs sejam minimizadas ou que a interferência não seja prejudicial aos usuários licenciados [4] [12]. Os principais objetivos dos protocolos MAC para redes com rádios cognitivos são: (1) otimizar a detecção espectral e a decisão de acesso ao espectro; (2) controlar o acesso multiusuário em redes multicanais; (3) alocar o espectro de rádio e escalonar a transmissão do tráfego; e (4) suportar a função de comércio do espectro [12].

De acordo com [5], os protocolos MAC têm um papel importante nas seguintes funções do CR: (1) mobilidade espectral; (2) detecção do canal; (3) alocação do recurso; e (4) acesso ao espectro.

O transceptor que usa um determinado protocolo MAC é responsável pela detecção espectral em uma ampla faixa de canais e pelas decisões de acesso ao espectro, que devem ser precisas. Esses protocolos devem também prover sincronismo em tempo e banda espectral entre transmissores e receptores cognitivos,

o que é uma necessidade para que se tenha comunicação com sucesso entre os CRs [12].

Na rede primária, os protocolos MAC são importantes para organizar eficazmente o acesso de seus usuários aos canais do tipo *broadcast*. Na rede secundária, estes protocolos também são responsáveis por organizar o acesso dos seus usuários ao canal de maneira oportunista e evitar ou tornar tolerável a interferência prejudicial para os usuários primários, se a banda em questão for licenciada [14].

Um grande número de estudos sobre protocolos MAC para redes de rádios cognitivos foi realizado em [5] e [15], onde eles são analisados e classificados. A importância deste tema para as funções do CR é o grande motivador das pesquisas e estudos sobre protocolos MAC para CRN [15].

Em [14], o desempenho das redes primária e secundária e o desempenho global do sistema são analisados para vários protocolos de acesso ao meio. No chamado **modelo original de [14]**, na primeira arquitetura analisada, os usuários usam o protocolo *Slotted Aloha* tanto na rede primária, quanto na secundária. Num segundo caso analisado, as estações da rede licenciada continuam a usar *Slotted Aloha* e os usuários da rede secundária operam com o protocolo *Slotted CSMA*.

Na análise apresentada em [14] considera-se um canal com desvanecimento por Rayleigh e efeito de captura, de modo que, quando um pacote *captura* o receptor, ele é considerado recebido corretamente.

Em [16], contudo, são diferenciados o efeito de captura e a recepção com sucesso. Esta última é um evento que ocorre quando o receptor é capaz de decodificar uma sequência de *bits* de um pacote transmitido por uma das estações da rede sem erros, ou com um número tal de erros possíveis de serem corrigidos pelo código corretor empregado. O efeito de captura e a recepção com sucesso não são eventos coincidentes, ou seja, a *captura* do receptor não significa necessariamente recepção com sucesso.

O conhecimento da taxa média de erros de pacotes em sistemas de comunicação é importante, uma vez que na maioria desses sistemas os dados são transmitidos em pacotes. Além disso, o desempenho deles, em termos de vazão e atraso médio normalizado, é determinado pela taxa média de erros de pacotes - *Packet Error Rate* (PER), ao invés da taxa média de erros de *bits* – *Bit Error Rate* (BER) ou de símbolos – *Symbol Error Rate* (SER) [17]. A taxa média de erros de pacotes é um dos fatores mais importantes que caracterizam transmissões de pacotes de canais de rádio sem fios [18].

Assim sendo, neste trabalho propõe-se uma extensão do *modelo original*, dando origem a um *novo modelo*, onde estuda-se e analisa-se o desempenho da rede primária, secundária e a performance global das arquiteturas de redes apresentadas no modelo original, porém, levando também em consideração o efeito da PER sobre tais desempenhos. Como as arquiteturas do modelo original foram analisadas numericamente e validadas por simulações, isso permite comparar os resultados dos cálculos dos desempenhos quando a PER é considerada ou não.

Para avaliar o impacto da PER nas redes, utiliza-se o método de cálculo da PER através de limitante superior apresentado em [17] e que é brevemente apresentado no Capítulo 2. Esse método foi analisado numericamente e validado por simulações e a conclusão é que tal método é bastante preciso dependendo de certas condições, como o tamanho do pacote usado.

As etapas para o desenvolvimento deste trabalho foram:

1. estudo e análise de método para cálculo da vazão e do atraso médio normalizado para as arquiteturas de redes de rádios cognitivos propostas;
2. estudo e análise de um método de cálculo da PER usando limitante superior;

3. extensão do trabalho apresentado em [14], através do cálculo da vazão e do atraso médio normalizado das redes considerando a PER;
4. desenvolvimento da proposta de trabalho futuro apresentada em [14] e que propunha o cálculo do atraso médio para a rede secundária da arquitetura apresentada no Capítulo 4; e
5. desenvolvimento de programas em MATLAB para suportar o trabalho apresentado, incluindo a simulação por Monte Carlo do atraso médio normalizado da rede secundária do Capítulo 4.

1.4. Estrutura e contribuições da dissertação

Rádio cognitivo é considerado a tecnologia chave para acessar dinamicamente o espectro de frequências de maneira oportunista e visando a melhorar a eficiência no uso desse importante recurso natural [2] [4]. Na realidade, CR baseado em acesso espectral dinâmico emerge como um novo paradigma de projeto para as redes sem fios da próxima geração [1]. Redes de rádios cognitivos irão prover grandes larguras de faixas para usuários móveis via arquitetura de redes sem fios heterogêneas e acesso flexível ao espectro pelos usuários secundários, sem causar prejuízos às comunicações dos usuários licenciados [1] [2]. O controle de acesso ao meio tem importante papel sobre várias funções dos rádios cognitivos [5]. Dentro deste escopo, a contribuição deste trabalho consiste em estudar e analisar a questão do controle de acesso ao meio e algumas técnicas de múltiplo acesso em redes de rádios cognitivos.

O Capítulo 2 apresenta algumas fundamentações teóricas usadas neste trabalho, abordando as questões referentes à propagação do sinal em um canal sem fios e o estudo de ruído e da interferência. Além disso, são estudados alguns métodos para cálculo da taxa média de erros de pacotes e apresentado o método de Xi et al (2011) para cálculo da PER [17]. Encerrando o capítulo, alguns protocolos de múltiplo acesso, usados neste trabalho, são rapidamente introduzidos.

No Capítulo 3 é apresentada uma arquitetura de rede que usa protocolo *Slotted Aloha* tanto na rede primária, quanto na rede secundária. Neste capítulo é analisado o desempenho desta arquitetura, em termos de vazão e de atraso médio normalizado, considerando o modelo original apresentado em [14] e um novo modelo introduzido neste trabalho e que faz o seu estudo e análise do desempenho considerando o efeito da PER devido à interferência causada pelas estações das redes.

O Capítulo 4 traz uma outra arquitetura de rede, onde na rede primária é proposto o protocolo *Slotted Aloha* e na rede secundária, o *Slotted CSMA*. Novamente o desempenho das redes é analisado tanto para o modelo original e um novo modelo que considera o efeito da PER devido à interferência nas redes. O Capítulo 4 mostra ainda um método para cálculo do atraso médio de acesso da rede secundária.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e propostas para futuros trabalhos.

As principais contribuições desta dissertação são listadas a seguir:

1. proposta de dois novos modelos para o cálculo da vazão e do atraso médio para as arquiteturas de rede baseadas em protocolos *Slotted Aloha* e *Slotted CSMA*, considerando o efeito da PER sobre os métodos propostos em [14] e tornando assim os modelos mais realistas;
2. desenvolvimento de um método para cálculo do atraso médio da rede secundária da arquitetura apresentada no Capítulo 4.

1.5. Publicações

Durante o trabalho de pesquisa, foram elaborados e publicados três artigos, conforme mostrados a seguir.

- a) Análise da vazão em redes de rádios cognitivos usando *Slotted Aloha*, publicado no XXX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBrT’12, 13 a 16 de setembro de 2012, BRASÍLIA, DF;

- b) *AVERAGE DELAY IN COGNITIVE RADIO NETWORKS USING SLOTTED ALOHA*, publicado na *5th International Conference on Communications, Computers and Applications*, 12 a 14 de outubro de 2012, Istambul, Turquia.

- c) *A New Throughput Analysis in Cognitive Radio Networks Using Slotted CSMA*, publicado na *The Third International Conference on Advances in Cognitive Radio*, COCORA 2013, 21 a 26 de abril de 2013, em Veneza, Itália.

O Capítulo 2, apresentado a seguir, traz alguns fundamentos teóricos usados neste trabalho e apresenta resumidamente alguns métodos para o cálculo da PER.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS E CÁLCULO DA TAXA MÉDIA DE ERROS DE PACOTES

2.1. Introdução

O objetivo deste Capítulo é estudar alguns métodos para o cálculo da taxa média de erros de pacotes e apresentar resumidamente os fundamentos teóricos usados neste trabalho – desvanecimento no canal, interferência, efeito de captura e protocolos MAC.

Os canais em sistemas de comunicações sem fios representam um desafio para a transmissão de dados de forma confiável e em alta velocidade. A transmissão é susceptível ao ruído, interferência e ao desvanecimento encontrados no canal [19].

O desvanecimento representa as variações temporais da potência do sinal recebido, causadas pelas mudanças nas condições de propagação do sinal pelo canal, pela propagação multipercurso [20] e pela movimentação do usuário [19]. O desvanecimento multipercurso resulta em rápidas variações nos envelopes dos sinais que chegam ao receptor vindos de diversas direções com fases diferentes e que se combinam vetorialmente [21]. Os modelos de desvanecimento afetam o sinal recebido pela adição construtiva ou destrutiva de diferentes componentes multipercursos introduzidos pelo canal [19]. Desta forma, a amplitude do sinal recebido é uma variável aleatória que é geralmente analisada considerando alguma distribuição conhecida de probabilidade, como é caso da distribuição de Rayleigh [22], usada em todos os estudos das arquiteturas de sistemas de comunicação analisadas neste trabalho.

Em um mundo digital e sem fios, é necessário lidar com muitas fontes de interferência [23]. Em um canal de comunicação, as transmissões de dados podem causar interferências nos receptores, de forma que uma mensagem pode não ser recebida corretamente, ou seja, o sucesso de uma transmissão entre um par de rádios não é independente das demais [24]. Para aumentar a probabilidade de sucesso, a interferência deve ser eliminada ou controlada. Este objetivo pode ser conseguido com o compartilhamento do canal por vários usuários que usam os protocolos de comunicação adequados à rede e ao meio. Neste caso, o modelo de alocação do recurso é fundamental para o bom funcionamento da rede e os protocolos MAC visam organizar o acesso ao canal [24] [25].

O conhecimento do desvanecimento no canal e da interferência são importantes para se estudar dois eventos independentes: (1) o efeito de captura, e (2) a taxa média de erros de pacotes. Por sua vez, ambos os eventos afetam o desempenho, em termos de vazão e atraso médio, das redes das arquiteturas de sistemas analisados neste trabalho.

No modelo tradicional de rede, quando duas ou mais estações transmitem ao mesmo tempo, ocorre a colisão e o pacote é retransmitido após um determinado tempo aleatório [24] [26]. O efeito de captura é a habilidade de certos rádios detectarem corretamente o sinal mais forte de um transmissor (sinal de interesse), desde que a soma das interferências dos outros rádios no receptor seja menor que a potência do maior sinal, mais uma margem de proteção [26].

O conhecimento da PER é muito importante, uma vez que na maioria dos sistemas de comunicações, os dados são transmitidos em pacotes ao invés de fluxo de *bits* de símbolos [17].

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma: em 2.2 é estudado o desvanecimento e seus efeitos sobre as comunicações de dados em redes sem fios; na Seção 2.3 é abordada a questão da interferência no canal; em 2.4 é apresentado o efeito de captura; a Seção 2.5 traz uma introdução sobre PER,

apresentando mais detalhadamente o método de cálculo usado no decorrer deste trabalho; e, finalmente, em 2.6, os protocolos MAC são brevemente estudados.

2.2. Análise da propagação do sinal em canal sem fios

O desvanecimento em canais sem fios de sistemas de comunicações terrestres é caracterizado por dois efeitos chamados de desvanecimento de grande escala e de pequena escala [21] [22].

A perda no percurso e o sombreamento produzem uma variação na potência do sinal recebido em função da distância e são percebidos em distâncias relativamente grandes, sendo, portanto, chamados de desvanecimento de grande escala. A perda no percurso é causada pela dissipação da potência irradiada pelo transmissor e pelos efeitos de propagação do sinal no canal. O sombreamento, do inglês *shadowing*, é resultado dos obstáculos entre as estações que atenuam o sinal pela sua absorção, reflexão, dispersão e difração [19] [21].

De acordo com [18], o efeito do sombreamento sobre os valores médios dos sinais que chegam no receptor pode ser ignorado, uma vez que o tempo necessário para receber um pacote é muito pequeno para que haja uma variação significativa nos valores médios dos sinais devido a este efeito. Assim sendo, nos cálculos e análises de desempenhos de protocolos MAC mostrados neste trabalho, o efeito do sombreamento não é considerado.

A Figura 2.1 mostra um típico canal com propagação multipercurso. No receptor, então, podem chegar várias réplicas do mesmo sinal que percorrem diferentes percursos, com fases e atrasos aleatórios que se somam vetorialmente de maneira construtiva ou destrutiva. O desvanecimento multipercurso ocorre ou é percebido em distâncias relativamente curtas (da ordem do comprimento de onda), sendo denominado de desvanecimento de pequena escala [19] [21].

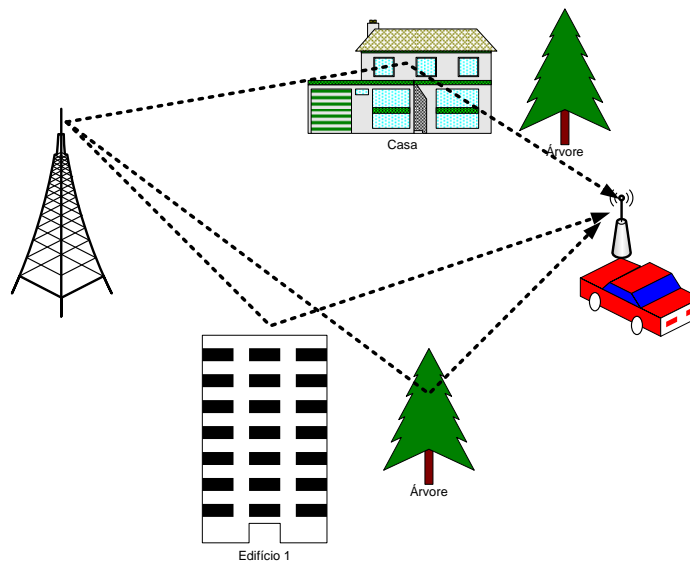


Figura 2.1 – Propagação multipercurso.

A velocidade das flutuações do sinal recebido depende da velocidade relativa entre transmissor e receptor. Embora os canais multipercursos sejam variantes no tempo, pode-se observar que eles não variam significativamente durante um certo intervalo de tempo chamado de tempo de coerência. Quando o tempo de sinalização ou de símbolo é menor que o tempo de coerência, então a informação é transmitida antes que as características do canal mudem e ele é considerado lento. Caso contrário, o perfil do canal muda antes que o símbolo seja recebido e, neste caso, trata-se de um canal rápido [22].

A amplitude do sinal recebida é uma variável aleatória e geralmente é analisada considerando alguma distribuição conhecida de probabilidade, como Rayleigh, Rice e Nakagami [22].

2.2.1. Desvanecimento de Rayleigh

O desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh ocorre quando existe múltiplos percursos indiretos entre o receptor e o transmissor, não havendo nenhum caminho dominante ou especular, ou ainda, linha de visada entre eles [20].

Quando o sinal recebido é composto por várias ondas provenientes de múltiplos percursos, o envelope recebido, $g(t)$, pode ser tratado como um processo estocástico Gaussiano complexo de média nula e estacionário no sentido amplo [21].

$$g(t) = g_I(t) + jg_Q(t). \quad (2.1)$$

Onde $g_I(t)$ e $g_Q(t)$ são as componentes em fase e quadratura do envelope complexo recebido. Para alguns ambientes multipercursos, estas componentes são variáveis aleatórias Gaussianas com média nula, independentes e identicamente distribuídas em qualquer instante de tempo. Nestas condições, a amplitude do envelope complexo recebido, $r=|g(t)|$, segue a distribuição de Rayleigh, cuja função de densidade de probabilidade é mostrada a seguir [21] [27].

$$p_R(r) = \begin{cases} \frac{2r}{\Omega} e^{-r^2/\Omega}, & r \geq 0 \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (2.2)$$

onde r é a amplitude do envelope recebido e Ω é o segundo momento de r , isto é, $\Omega=E[R^2]$ [14] [27].

Seja o teorema apresentado a seguir [27]:

$$f_Y(y) = \frac{f_X(x)}{|g'(X)|} \Big|_{x=g^{-1}(y)} \quad (2.3)$$

$$|g'(X)| = \left| \frac{dY}{dX} \right|.$$

Onde X e Y são variáveis aleatórias, $f_Y(y)$ e $f_X(x)$ são funções de distribuição de probabilidade. Em [28], este teorema é denominado teorema da transformação de variáveis aleatórias simples.

Aplicando este teorema na Eq.(2.2), o correspondente envelope quadrático, $r^2=|g(t)|^2$, é exponencialmente distribuído em qualquer instante de tempo, como mostrado a seguir [21].

$$p_x(x_p) = \frac{1}{X_p} e^{-x_p/X_p}. \quad (2.4)$$

Onde x_p é o valor instantâneo da potência recebida e X_p é o valor médio da potência do sinal na recepção, sendo que $X_p = \Omega$.

2.3. Ruído e interferência em sistemas de comunicação

O termo ruído pode ser associado a quaisquer danos, normalmente aleatórios, que afetam o desempenho de um sistema de comunicação [27]. Eles podem ser classificados em categorias, como ruído térmico, de intermodulação, *crosstalk* ou impulsivo [20]. Destes, o ruído térmico e o impulsivo são os mais importantes na análise do desempenho de sistemas de comunicação [27].

2.3.1. Relação sinal-ruído

A relação entre sinal e ruído - *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) é usada para medir a qualidade do enlace de comunicação. De modo geral, a SNR é definida como [29]:

$$SNR = \frac{S_i}{N_G} = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}}. \quad (2.5)$$

Onde SNR é a relação entre sinal e ruído, S_i e P_{sinal} representam a potência do sinal que transporta a informação e N_G e $P_{ruído}$ representam a potência do ruído Gaussiano branco aditivo - *Additive White Gaussian Noise* (AWGN).

Na escala de decibel, tem-se [29]:

$$SNR_{dB} = 10 \log \frac{P_{\text{sin al}}}{P_{\text{ruído}}} = P_{\text{sin al}} (dB) - P_{\text{ruído}} (dB). \quad (2.6)$$

Na presença de sistemas de rádio com interferência, a qualidade do enlace pode ser medida através da relação entre sinal e interferência mais ruído - *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (SINR), calculada conforme dado a seguir [29]:

$$SINR = \frac{S_i}{N_G + Y} = \frac{P_{\text{sin al}}}{P_{\text{ruído}} + P_{\text{int erf}}}. \quad (2.7)$$

Onde Y e P_{interf} representam a potência resultante da interferência na rede. Em sistemas de comunicação limitados pela interferência, o ruído é pequeno e pode ser desconsiderado. Neste caso, é usada a relação entre sinal e interferência para medir a qualidade do enlace, conforme será visto posteriormente [30].

2.3.2. Interferência

De acordo com [31], interferência é o efeito indesejado devido a uma combinação de emissões, radiações ou induções na recepção de um sinal em um sistema de radiocomunicações, manifestada através de qualquer degradação de desempenho, falsa interpretação ou perda de informação que poderia ser recebida com sucesso quando da ausência de tal energia indesejada.

A Figura 2.2 mostra um ambiente típico de interferência em um receptor. Nos sistemas de rádios, a interferência no receptor depende de vários fatores, como a distância entre as estações, a frequência de transmissão, a potência de transmissão praticada, as características de propagação do sinal no canal, técnica de modulação e codificação, dentre outros [29].

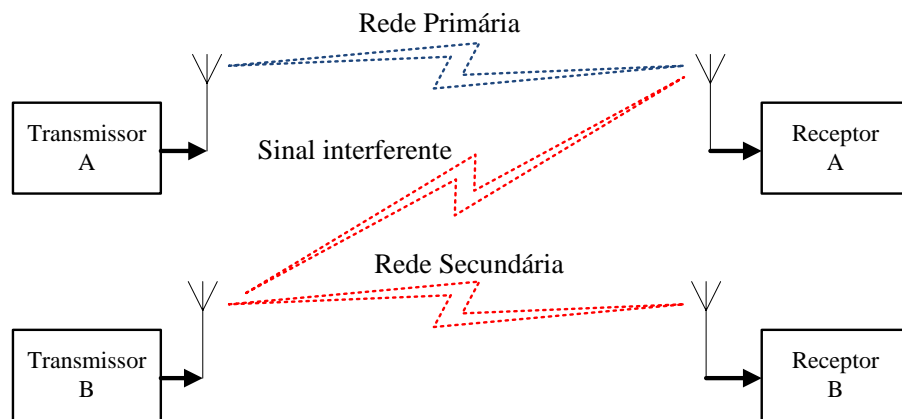


Figura 2.2 – Arquitetura de redes com presença de interferência no receptor A.

2.3.3. Relação sinal-interferência

A relação entre sinal e interferência - *Signal-to-Interference Ratio* (SIR) é usada como um parâmetro para especificar a qualidade de um serviço oferecido pelo sistema de comunicação. Para este sistema, a análise qualitativa depende do número de erros causados na operação de recepção dos dados em um dado ambiente particular de interferências. Geralmente, estas razões são definidas *a priori* de modo a garantir a qualidade satisfatória do serviço e pode ser calculada como [23]:

$$SIR = \frac{X_p}{\sum_{i=1}^{I_p} Y} \quad (2.8)$$

Onde *SIR* é a relação entre sinal e interferência, X_p é a potência média do sinal do pacote de interesse, Y é a potência média dos sinais dos pacotes interferentes e I_p é o número de estações consideradas interferentes no sistema de comunicação.

2.4. Efeito de captura

Em canais de comunicação sem fios, os sinais dos pacotes que chegam ao receptor possuem níveis de potência diferenciados devido à distância entre os

transceptores, ao nível de potência de transmissão praticada e ao sombreamento ou ao desvanecimento [32] [33] [34].

O efeito de captura é um fenômeno onde um sinal de maior intensidade presente na recepção, domina as decisões requeridas para que o receptor estime ou reconstrua o pacote de dados transmitido, mesmo na presença de ruído e interferência mútua entre as estações [16] [26].

Os níveis de potência recebidos, o tipo de modulação, a robustez de sincronização do receptor, as características da interferência e o desvanecimento do canal são algumas das condições que influenciam o valor da probabilidade de captura do receptor por um sinal [16]. Por outro lado, em canais limitados pela interferência, o desempenho da rede é afetado principalmente pela interferência, podendo o ruído ser ignorado nos cálculos de desempenho da rede [18] [30].

O método mais simples e comum de contabilizar o efeito de captura é o baseado no modelo do limiar da razão entre sinal e interferência [33]. Neste caso, se a razão entre o nível de potência do sinal de um pacote de interesse e a soma das potências dos sinais dos pacotes considerados interferentes é maior que um determinado limiar, R , chamado de razão de captura, então o receptor é *capturado* pelo sinal de maior nível do pacote de interesse. A probabilidade de captura, P_{cap} , pode ser expressa como [14] [33]:

$$P_{cap} = \Pr \left(\frac{x_p}{\sum_{i=1}^{N_p-1} y_i} > R \right). \quad (2.9)$$

Onde x_p é a potência do sinal de um pacote de interesse ou de teste recebido, y_i é a potência do sinal de um pacote considerado interferente, N_p é o número total de estações transmissoras em um dado instante e R é a razão de captura.

A razão de captura é um limiar escolhido adequadamente e que depende do esquema de modulação, da codificação usada ou não no canal e das características do receptor [16] [33].

2.5. Taxa média de erros de pacotes

O desempenho de um sistema de comunicação geralmente é medido por meio da taxa média de erros de *bits* ou pela taxa média de erros de pacotes (PER). A BER é utilizada há muito tempo para avaliar o desempenho de sistemas de comunicação e é uma aproximação da probabilidade de erro de *bits*, que pode ocorrer durante uma transmissão, sendo dependente da técnica de modulação empregada, do nível instantâneo da SNR e dos efeitos do desvanecimento no canal [35]. De acordo com [36], o comportamento médio da BER não é suficiente para caracterizar com precisão o processo de erros relacionados com uma sequência de pacotes, sendo usada neste caso a PER. Os erros de *bits* na camada de enlace, por exemplo, podem resultar na perda do pacote inteiro. A perda de um pacote de uma mensagem pode resultar na perda de toda ela. Assim sendo, é importante buscar um modelo preciso e replicável, que permita analisar o desempenho de um sistema no nível de pacote [37].

Muitos sistemas de comunicação transmitem informações em forma de pacotes de dados, que são constituídos por uma certa quantidade de *bits* [35] [37]. Para a análise de desempenho das camadas superiores dos protocolos de comunicação para redes sem fios, é necessário conhecer a dinâmica e o modelo preciso dos eventos de erros nesta rede [35] [37] e, portanto, o conhecimento do processo de erros de pacotes, que descreve as falhas e os sucessos nas transmissões de pacotes em canais sem fios, é considerada importante [38]. Desta forma, a PER é um importante parâmetro para avaliar o desempenho de um sistema de comunicação [35] [36] [39]. Basicamente, a PER depende da probabilidade de erros de *bits*, do comprimento do pacote e do tempo de coerência do canal, isto é, do tempo médio em que as características para propagação do sinal em um canal se mantêm estáveis [35].

Os efeitos de propagação do sinal em um canal sem fios, como reflexão, dispersão, difração e a existência ou não de linha de visada, interferem diretamente

na precisão dos modelos usados para analisar os erros de pacotes. As características de um canal podem sofrer grandes variações mesmo em curtas distâncias e, deste modo, é difícil ter um modelo genérico para cálculo da PER [37].

2.5.1. Revisão bibliográfica

Muitos estudos são realizados para o desenvolvimento de modelos de erros de pacotes na recepção [37] [38]. A maioria dos modelos estudados usa três abordagens para calcular a PER: (a) processos Markovianos; (b) levantamento estatístico de informações reais em campo, com posterior designação de uma distribuição estatística aproximada e conhecida; e (c) usando limitantes superiores ou inferiores. A seguir é feita uma revisão bibliográfica resultante de pesquisas realizadas para este trabalho. Destes estudos, o modelo apresentado em [17] é analisado mais detalhadamente. Este modelo é usado nos estudos e análises de desempenhos das redes sem fios deste trabalho, pois, (1) ele pode ser usado para calcular a PER para sistemas de comunicações genéricos, que empreguem ou não esquemas de codificação de canal; (2) foi desenvolvido considerando um canal com desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh; e, (3) apresenta uma boa precisão para a PER, dependendo do tamanho do pacote de dados usado no sistema. Por outro lado, excetuando-se o método de [18], as dificuldades com os modelos Markovianos residem em ajustar as probabilidades de transição dos estados de modo a refletir o comportamento real do canal considerado.

Em [37] são apresentados e desenvolvidos métodos genéricos para calcular de forma aproximada a taxa de erros de pacotes em canais de transmissão com desvanecimento lento do sinal, classificados em dois grupos: analíticos e empíricos. Por sua vez, o método analítico é ainda dividido em outros dois: (1) orientado à camada física e (2) orientado para camadas superiores. No método analítico orientado à camada física, os autores mostram o cálculo da BER para algumas técnicas de modulação. O método orientado para camadas superiores traz, de forma resumida, como a PER poderia ser calculada usando uma cadeia de Markov de dois estados, conhecida como modelo Gilbert-Elliott (GE) [40] [41]. Em [37], conclui-se

que os métodos analíticos são imprecisos, trabalhosos e dependem da correta caracterização do ambiente de análise. O método empírico consiste de quatro fases: coleta de informações, análise estatística, construção do modelo e sua validação. Em seguida, os autores usam informações de um ambiente estudado pela *American Telephone & Telegraph (AT&T)* para desenvolver e validar este método, concluindo ao final que este último método seria mais preciso e menos complexo.

Na referência [42], uma cadeia de Markov de N_e estados é usada para caracterizar o sistema de comunicação com desvanecimento lento, segundo a distribuição de Rayleigh, e calcular a probabilidade de erros de símbolos por aproximação, aplicando o conceito de autovetores e autovalores sobre as matrizes de transição. Nesse trabalho não é informado como se podem obter os valores iniciais das probabilidades de erros de *bits* e de transições de estado e não é considerado o desvanecimento multipercurso no canal e a possibilidade de que os transceptores podem se deslocar.

Em [43] também é usado o modelo de canal GE, definindo uma cadeia de Markov com dois estados: *Good* e *Bad*. A seguir é apresentado um método recursivo que usa análise combinatória para calcular a função de distribuição de probabilidades - *Probability Density Function (PDF)* em função do comprimento da sequência de *bits* sem erros (*Gap*) e com erros em um pacote de dados (*Burst*). De posse do modelo de distribuição, calculam-se a BER e a PER de forma aproximada e demandando recursos computacionais.

Em [44], os autores analisam um modelo baseado na cadeia de Markov de ($N_e = 2$) estados para canais com desvanecimento muito lento. É sugerido que a SNR seja particionada em N_e intervalos por meio de heurísticas propostas pelos autores e cada intervalo representaria um estado da cadeia de Markov. Para se calcular as probabilidades de transição de estados, seria usada a taxa de cruzamento de limiar - *Level Crossing Rate (LCR)*, que depende da frequência Doppler e, por consequência, da velocidade com que o transceptor se move. Os autores afirmam ainda que, mesmo sendo possível calcular as probabilidades de transição de estados, em simulações o que importa é o tempo médio despendido em cada estado, que são calculados com

base no tempo de coerência do desvanecimento do sinal. Por fim são discutidos os métodos para validação e medida da precisão dos modelos que usam cadeias de Markov. São analisados dois métodos: (1) um que emprega teoria da informação e (2) por comparação das correlações entre os processos. A conclusão do trabalho é que o método que usa correlação é mais bem embasado quando comparado com resultados de simulações. Por fim, comentam que ainda não é especificado na literatura disponível como fazer o particionamento da SNR de forma que esta reflita as condições do canal físico real.

Em [45], o modelo de Markov de N_e estados e o modelo GE são novamente usados para modelar as características de erro em um canal sem fios, sujeito a desvanecimento muito lento de acordo com a distribuição de Rayleigh, onde os transceptores movem-se com velocidades moderadas. Assim como em [44], em [45] é tratada a importância de se determinar o tempo médio de permanência em um estado e afirma-se que este tempo segue uma distribuição geométrica, sendo então apresentadas fórmulas para calculá-lo. O artigo mostra também como calcular as probabilidades da matriz de transição usando a LCR, a velocidade de deslocamento do transceptor e as probabilidades de erro de *bits*. Conhecendo-se o valor médio da SNR, calcula-se então a BER e a PER. Por fim, os autores apresentam suas próprias heurísticas para o particionamento da SNR, sendo que para canais com desvanecimento muito lento, eles recomendam que se use ($N_e=4$).

Em [46], analisam-se a validade e precisão dos modelos que usam cadeia de Markov com finitos estados, usando método baseado na teoria da informação e outro baseado na comparação qualitativa das funções de autocorrelação do envelope que representa o processo de desvanecimento. Para validar os resultados obtidos para diversos parâmetros do modelo, incluindo a PER, é feita uma comparação entre os modelos de Markov e a simulação usando *Isotropic Scattering, Omnidirectional Receiving Antenna* (ISORA), sendo este último considerado como um simulador de referência em [45]. A conclusão do artigo é que os modelos de Markov de primeira ordem são adequados para canais com desvanecimento muito lento, porém no artigo não é apresentada uma forma clara de se calcular a PER especificamente em função da SNR.

Em [39], considera-se a tarefa de se calcular a PER em canais de Rayleigh não seletivos em frequência, estacionários e considerados muito lentos, através de investigação analítica e simulação. Neste artigo, no qual é empregado o modelo que usa a cadeia de Markov de ordem ν para calcular a PER, está desenvolvida uma metodologia complexa para cálculo da distribuição da função de erros de pacotes - *Packet Error Distribution* (PED). Conhecendo o valor médio da BER e usando iterações recursivas para a PED condicional, obtém-se a PER em função do esquema de modulação empregado e da capacidade do código de correção de erros.

Em [47], emprega-se o modelo GE para o canal com desvanecimento muito lento dado pela distribuição de Rayleigh. O artigo fornece informações para se calcular as probabilidades de transição de estados em função da duração do símbolo, do valor médio da SNR e da frequência Doppler. Também mostra como obter a BER para cada um dos estados e a probabilidade de erros de símbolos.

Em [48], usa-se o modelo GE em um canal com desvanecimento muito lento por Rayleigh, com memória. No modelo GE, usa-se uma cadeia de Markov de primeira ordem estacionária e discreta no tempo. O artigo recorre a [47] para determinar a matriz de probabilidades de transição, a BER e a matriz de probabilidades de regime permanente. Em [48] são fornecidas informações adicionais de como calcular a PER usando a metodologia apresentada em [39] e a LCR.

Em [18], considera-se um modelo Markoviano com dois estados para representar o processo no nível de enlace e calcular a PER de forma aproximada. Neste caso, a PER é obtida em função da duração do pacote, da frequência Doppler devido ao deslocamento dos rádios e do número estimado de percursos que o sinal de interesse e os sinais considerados interferentes percorrem até chegar ao receptor, que resultam no desvanecimento multipercurso lento ou seletivo. Além disso, o método pode ser usado em redes com infraestrutura ou *ad-hoc*. A taxa média de cruzamento do limiar da SIR (LCR) e a duração média de falha - *Average Outage Duration* (AOD) são calculadas empregando-se métodos desenvolvidos naquele trabalho e, com isso, obtém-se uma maneira não empírica para calcular as probabilidades de

transição de estado e as probabilidades de estado da cadeia de Markov. Uma vez conhecidas tais probabilidades, é deduzida então uma fórmula para cálculo da PER. Este método, no entanto, não é usado neste trabalho, pois ele depende fundamentalmente do número de percursos percorridos pelo sinal de interesse e pelos interferentes e da velocidade com que os usuários se deslocam na rede; variáveis estas que não podem ser conhecidas ou estabelecidas *a priori*, não permitindo a generalização do método, diferentemente do que ocorre com aquele apresentado em [17].

2.5.2. Cálculo da PER através de limitante superior geral

Em [17] é proposto um cálculo do valor da PER em função da SNR, usando um limitante superior, em um canal sem fios com desvanecimento por Rayleigh. Os resultados obtidos são validados por simulação e são bastante precisos dependendo do tamanho do pacote escolhido para o sistema. O método pode ser aplicado em sistemas com e sem codificação de canal.

Seja ξ um símbolo de um pacote transmitido com potência média, P_{signal} , em um canal sem fios com desvanecimento lento de Rayleigh e y a amplitude do sinal recebido, que pode ser calculado conforme a expressão a seguir [17]:

$$y = \alpha \sqrt{P_{\text{signal}}} \xi + n_0. \quad (2.10)$$

Onde α é o coeficiente de desvanecimento instantâneo do canal ou ganho do canal, com valor médio quadrático $E[\alpha^2]=1$ e n_0 é o ruído Gaussiano complexo com densidade espectral de potência igual a N_0 .

No caso de desvanecimento lento, α permanece constante durante um intervalo de tempo igual ou superior à duração do símbolo, mas varia de maneira independente de um símbolo para outro. No receptor, o valor instantâneo da SNR, δ , é dada por [17]:

$$\delta = \frac{|\alpha|^2 P_{\text{sin al}}}{N_0}. \quad (2.11)$$

O valor médio da SNR, Δ , em um canal com ruído AWGN é dado então por [17]:

$$\Delta = E \left[\frac{|\alpha|^2 P_{\text{sin al}}}{N_0} \right] = \frac{P_{\text{sin al}}}{N_0}. \quad (2.12)$$

Seja agora uma função $f(\delta)$ que relaciona a PER com a SNR instantânea em um canal com ruído AWGN e $g(\delta)$ a função de distribuição de probabilidade da SNR recebida. O valor médio da PER, $P_{\text{ave}}(\Delta)$, pode ser calculada como abaixo [17]:

$$P_{\text{ave}}(\Delta) = \int_0^{\infty} f(\delta) g(\delta) d\delta. \quad (2.13)$$

Para canal com desvanecimento por Rayleigh, a SNR instantânea é exponencialmente distribuída e o valor médio da PER é dado então por [17]:

$$P_{\text{ave}}(\Delta) = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\infty} f(\delta) e^{-\frac{\delta}{\Delta}} d\delta. \quad (2.14)$$

O cálculo da PER usando a Eq.(2.14) é difícil quando se considera um caso geral que compreende várias técnicas de modulação, diversos tamanhos de pacotes e diferentes esquemas de codificação de canal [17]. Assim sendo é proposto um método de cálculo da PER usando limitante superior.

Seja $f(x)$ um limitante, não negativo e integrável no intervalo $[a, b]$, que $(0 \leq f(x) \leq F)$ e que w_0 é um valor constante e igual ao resultado da integração de $f(x)$ no intervalo $[a, b]$. Seja ainda $g(x)$ uma função monotonicamente decrescente e que a integral conjunta da Eq.(2.15) exista. Em [17] é demonstrado com detalhes que o seguinte lema da desigualdade das integrais é válido:

$$\int_a^b f(x)g(x)dx \leq F \int_a^{a+w_0/F} g(x)dx. \quad (2.15)$$

Seja agora $f(\delta)$ a probabilidade de erros de pacotes em um canal AWGN e δ o valor instantâneo da SNR no receptor. Supondo que a integral da função $f(\delta)$ exista no intervalo $[0, \infty)$, tem-se que w_0 é calculado da seguinte forma [17]:

$$w_0 = \int_0^\infty f(\delta)d\delta. \quad (2.16)$$

Da Eq.(2.13) e da Eq.(2.14), tem-se que a função $g(\delta)$ é dada por [17]:

$$g(\delta) = e^{-\delta/\Delta}. \quad (2.17)$$

Onde Δ é o valor esperado para a SNR no receptor.

Observando a Eq.(2.17), é possível verificar que $g(\delta)$ é monotonicamente decrescente se $(\delta \geq 0)$ e que $(0 \leq f(\delta) \leq 1)$, uma vez que $f(\delta)$ é uma probabilidade. Aplicando-se o lema da desigualdade das integrais e considerando então $F=1$, obtém-se a PER do sistema de comunicação, $P_{ave}(\Delta)$, de forma aproximada, conforme mostrado a seguir [17]:

$$\begin{aligned} P_{ave}(\Delta) &= \int_0^\infty f(\delta)g(\delta)d\delta = \\ &= \frac{1}{\Delta} \int_0^\infty f(\delta)e^{-\frac{\delta}{\Delta}}d\delta \\ P_{ave}(\Delta) &\leq \frac{1}{\Delta} \int_0^{w_0} e^{-\frac{\delta}{\Delta}}d\delta. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Resolvendo a integral da Eq.(2.18), tem-se então [17]:

$$P_{ave}(\Delta) \leq (1 - e^{-\frac{w_0}{\Delta}}). \quad (2.19)$$

Neste trabalho é empregado o seguinte procedimento para o cálculo da PER.

1. Realiza o cálculo da taxa de erro de *bits* para o canal AWGN, $b(\delta)$, em função da SIR presente no receptor, δ , e da técnica de modulação usada. Supondo modulação *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK) com detecção coerente, a BER dada por [17]:

$$b(\delta) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\delta). \quad (2.20)$$

Em sistemas limitados pela interferência, o ruído pode ser negligenciado nos cálculos [18] [30].

2. Calcula-se a probabilidade de erros de pacotes em função da BER, $b(\delta)$ e do tamanho dos pacotes usados na rede, nb , da seguinte forma [17]:

$$f(\delta) = \{1 - [1 - b(\delta)]^{nb}\}. \quad (2.21)$$

3. Usando alguma ferramenta de cálculo numérico, como MATLAB ou MATHCAD, a constante w_0 é calculada como dado na Eq.(2.16) [17]:

$$w_0 = \int_0^{\infty} f(\delta) d\delta. \quad (2.22)$$

4. Para cada arquitetura de rede escolhida neste trabalho, calcula-se o valor médio da SIR, Δ , e em seguida, finalmente, obtém-se a PER aproximada, conforme a Eq.(2.19) [17]:

$$P_{ave}(\Delta) \approx (1 - e^{-\frac{w_0}{\Delta}}). \quad (2.23)$$

2.6. Protocolos de múltiplo acesso

O meio mais simples de conectar duas estações é por meio de um enlace ponto a ponto. No entanto, à medida que o número de estações de uma rede cresce, a

conexão de todos os nós da rede se torna complicada e inadequada, devido à grande quantidade de enlaces requerida. Para uma rede com N_p usuários, a quantidade de enlaces ponto a ponto requerida, E_{pp} , é calculada por [49]:

$$E_{pp} = \frac{N_p(N_p - 1)}{2} \quad (2.24)$$

Numa rede do tipo *broadcast*, quando uma mensagem é destinada a um único receptor ou a um número pequeno de receptores, há processamento desnecessário para que a mensagem chegue ao destino e transmissões neste tipo de canal podem causar interferência e, conseqüentemente, nenhuma das mensagens pode ser recebida corretamente. Para aumentar a probabilidade de sucesso nas transmissões, as interferências devem ser evitadas ou controladas [24]. Desta forma, uma rede onde todas as estações usam e compartilham um meio de transmissão comum e o acesso ao canal ocorre apenas quando necessário, é mais eficiente [49]. O canal passa então a ser um recurso compartilhado, cuja alocação é crítica para a própria operação da rede [24].

Para compartilhar um canal de comunicação de maneira eficiente, todos os usuários da rede, considerados independentes, devem seguir um conjunto de regras para acessar o meio, denominadas protocolos de múltiplo acesso [49] [50]. Estes protocolos são esquemas de alocação de canais que possuem características de desempenho desejáveis [24].

Uma importante função de controle da rede é o *Medium Access Control* (MAC), que é o responsável pelo compartilhamento de um canal entre os usuários da rede, visando eficiência em termos de vazão agregada e uso do espectro [49].

O conceito de múltiplo acesso está presente nos sistemas de comunicação desde o início. O protocolo *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) foi usado em 1965 no primeiro satélite geoestacionário de uso comercial, o INTELSAT I e em 1971, a Universidade do Havai criou uma rede para interconectar seus computadores

através de um canal de rádio, usando o protocolo *Aloha*, conforme proposta de Norman Abramson em 1970 [50].

A canalização do meio é uma técnica amplamente adotada nas redes sem fios e consiste em fatiar o canal em um número de subcanais em termos de bandas de frequência, janelas de tempo, códigos com espalhamento espectral ou uma combinação deles [49]. Dependendo da política de compartilhamento usada, estes subcanais podem ser atribuídos de forma exclusiva aos usuários, ou podem ser acessados de forma aleatória ou ainda, de maneira híbrida [50].

2.6.1. Classificação dos protocolos de múltiplo acesso

Os protocolos de múltiplo acesso são classificados de muitas maneiras na literatura. Em [50], por exemplo, eles são classificados em: (1) protocolos com alocação fixa; de acesso aleatório ou com contenção; (3) alocação por demanda; e (4) protocolos híbridos.

Nos protocolos com alocação fixa, a alocação do recurso de comunicação para os usuários é feita de maneira estática e independente das atividades das estações. Nesse caso, o canal é fatiado em frequência, janelas de tempo ou códigos com espalhamento espectral e, como exemplo, pode-se citar o FDMA, o *Time Division Multiple Access* (TDMA) e o *Code Division Multiple Access* (CDMA) [50].

No segundo caso, nos protocolos de acesso aleatório, cada estação da rede decide quando acessar o recurso, de acordo com a sua demanda de tráfego e de maneira independente [50]. Neste caso, não há garantia de que a transmissão de um pacote, por exemplo, seja concluída com sucesso, uma vez que pode haver colisão de pacotes ou não ocorrer a *captura* do receptor, ou pode haver perda de dados do pacote. Estes protocolos são classificados ainda em assíncronos, por exemplo, *Aloha*, ou síncronos, como é o caso do *Slotted Aloha*, ou com detecção de portadora, como ocorre no CSMA [24] [50].

Nos protocolos com alocação por demanda, o meio de transmissão é alocado para cada usuário conforme sua demanda, exigindo algum tipo de coordenação entre as estações, de modo a evitar erro na recepção dos dados [50], como é o resultado das colisões em canais baseados em colisão. O controle da alocação pode ser centralizado, como é caso dos protocolos *Polling* ou distribuído, como ocorre nos protocolos de passagem de ficha e fila distribuída [50].

Por fim, nos protocolos híbridos, há a incorporação de características de dois ou mais tipos dos protocolos classificados anteriormente, como acontece, por exemplo, no *Reservation-Aloha* [50].

Uma classificação um pouco diferente da anterior, dedicada a redes sem fios com rádios cognitivos, é apresentada na literatura. Neste caso, as redes são classificadas como centralizadas, com infraestrutura, ou distribuídas. Para cada topologia de rede são estabelecidas três categorias possíveis de protocolos de múltiplo acesso: (1) protocolos baseados em acesso aleatório; (2) baseados em fracionamento ou divisão do tempo; e, (3) baseados em mecanismos híbridos [14] [15] [51] [52] [53] [54].

Os protocolos MAC de acesso aleatório geralmente são baseados no protocolo CSMA [53]. Os usuários da rede monitoram o espectro de interesse para detectar quando não há nenhuma outra transmissão em tal banda e comumente transmitem após um tempo aleatório, a fim de evitar colisões [15] [53]. Numa rede secundária com este protocolo, os usuários primários e secundários possuem um período de tempo dedicado à detecção de portadora. Como os usuários primários possuem prioridade de transmissão, seu período de detecção é menor e ocorre antes daquele destinado apenas aos usuários secundários. Por sua vez, os usuários secundários devem transmitir todo o seu pacote em uma única vez, a fim de reduzir a probabilidade de colisões [14].

Os protocolos baseados em janelas temporais necessitam de sincronização temporal em toda a rede. Neste caso, o tempo é dividido em janelas temporais tanto no canal de dados, quanto no canal comum de controle [15] [53].

Nos protocolos híbridos há uma combinação de protocolos MAC com acesso aleatório e com janelas temporais [14] [15] [53]. Neste tipo de protocolo, no canal de controle é usado esquema de acesso aleatório e os dados são transmitidos em janelas de tempo [14].

Redes com infraestrutura são aquelas que possuem uma entidade centralizada, por exemplo, estação de rádio base, que controla a alocação do espectro e os procedimentos de acesso ao meio. A sincronização e cooperação entre as estações podem ser realizadas neste tipo de rede. A estação de rádio base pode coletar informação do espectro através dos seus usuários e determinar o esquema final de uso do espectro ocioso [14]. O protocolo CSMA MAC, desenvolvido para redes com rádios cognitivos, é um exemplo de protocolo de acesso aleatório para este tipo de topologia de rede [15]. No padrão IEEE 802.22, do *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, por exemplo, é especificado o protocolo com janelas de tempo para os usuários secundários [8] [14]. Por fim, o DSA Driven MAC (DSA - *Dynamic Spectrum Allocation*) é um tipo de protocolo híbrido [14] [15].

Na topologia de rede distribuída, cada nó é responsável por controlar a alocação do espectro e os procedimentos de acesso. De acordo com [14], [15] e [53], neste tipo de rede pode ser impraticável trabalhar com protocolos MAC com janelas temporais, devido à necessidade de manter a sincronização em toda a rede e dificuldades de construção. Como exemplo de protocolos de acesso aleatório, em [14] e [15] são citados: SRAC MAC (SRAC - *Single-Radio Adaptive Channel*), HC-MAC (HC - *Hardware-constrained Cognitive*), DOSS (DOSS - *Dynamic Open Spectrum Sharing*) e DCA-MAC (DCA - *Dynamic Channel Assignment*). Para os protocolos com janela de tempo, em [15] é exemplificado o C-MAC (C - *Cognitive*) e, por último, os protocolos OS-MAC (OS - *Opportunistic Spectrum*), POMDP (POMDP - *Partially Observed Markov Process*), SYN-MAC (SYN - *Synchronized*) e *Opportunistic* MAC, são apresentados como tipos híbridos para esta topologia de rede [14] [15].

2.6.2. Análise dos protocolos MAC

Para analisar os protocolos MAC devem ser feitas algumas considerações com relação ao ambiente onde eles operam, caracterizando assim o tipo de canal, o canal de retorno, o tamanho e a geração da mensagem, o número de usuários e a capacidade de armazenamento, dentre outros [24].

O tipo de canal define como os erros ocorrem no meio onde os dados são transmitidos. Dois tipos de canais são estudados: (1) baseado em ruído e (2) baseado em colisão ou no efeito de captura [14] [24].

No primeiro caso, os erros podem ocorrer no recebimento de um pacote devido à presença de ruído e/ou interferência. Neste caso específico, o canal pode ser considerado com erros ou sem erros de transmissão, devido ao ruído [24] e/ou interferência. Os erros são contabilizados através da BER, SER ou PER.

O canal também pode ser baseado em colisão ou no efeito de captura [14]. A colisão é uma situação onde, do ponto de vista do receptor, duas ou mais transmissões se sobrepõem no tempo, totalmente ou parcialmente. O canal é dito baseado em colisão, quando todas as transmissões que colidem são consideradas como não recebidas corretamente e, na maioria das vezes, os dados são então retransmitidos [24]. Por outro lado, no canal baseado no efeito de captura, mesmo quando ocorre colisão, o pacote recebido com maior potência pode capturar o receptor com uma determinada probabilidade [14]. Devido a fatores como potência de transmissão praticada pelos transmissores e desvanecimento, os sinais dos vários pacotes que chegam ao receptor possuem níveis diferentes e, considerando o efeito de captura, o pacote com sinal de maior intensidade pode *sobreviver* [34].

Uma outra questão importante na análise dos protocolos MAC é o canal de retorno, que transporta as informações referentes às atividades anteriores no canal [24]. Nos estudos e análises feitas neste trabalho, assim como ocorre em [55], é considerado um canal de retorno sem erros, onde uma estação descobre instantaneamente se os seus dados foram transmitidos com sucesso ou não no final

de seu período de transmissão e, ainda, que não há limite de tempo máximo para receber os pacotes de confirmação de sucesso ou não da transmissão. Também, assim como em [24], é admitido que o canal de retorno não consome recursos do sistema, devido ao uso de um canal diferente ou pelo fato de que uma estação pode determinar localmente o estado de sua transmissão anterior.

Mensagem é a unidade básica de dados gerados por um usuário. Quando ela não pode ser transmitida em uma única vez, ela pode ser quebrada em porções menores, chamadas de pacotes. A duração do pacote, por sua vez, é determinada como sendo o tempo necessário para transmitir todos os dados que o compõem em um único acesso ao meio [24]. O tamanho e duração dos pacotes é definido durante os estudos e análises feitas para as arquiteturas de redes apresentadas neste documento.

No trabalho apresentado em [24] é considerado que os usuários são idênticos e em número muito grande, tendendo para infinito, e desta forma geram pacotes de acordo com a distribuição de Poisson. Em [14] é admitido um sistema discreto, onde os usuários são independentes, em número finito e geram novos pacotes conforme uma distribuição de Bernoulli. No caso de sistema discreto com número finito de usuários, o tráfego entrante segue uma distribuição Geométrica, ao invés de Poisson [19] [24] [55]. Neste trabalho é adotado sistema discreto com número finito de usuários devidamente especificado durante os estudos e análises das arquiteturas de redes propostas.

Cada usuário da rede possui um local de armazenamento de pacotes com capacidade unitária, isto é, apenas um pacote pode ser armazenado neste *buffer*. Quando a memória está ocupada, o usuário não pode gerar novos pacotes e ele é considerado no estado *backlogged*. Por outro lado, quando esta área de armazenamento de pacotes está livre, supõe-se que o usuário está no estado *thinking* e ele pode gerar novos pacotes segundo a distribuição de Bernoulli.

Assim como ocorre em [14], é considerado ainda que todos os usuários podem ser ouvidos pelos membros da rede sem fios em sua área de cobertura.

2.6.3. Métricas de desempenho dos protocolos MAC

Os protocolos de múltiplo acesso são avaliados de acordo com os seguintes critérios: (1) vazão; (2) atraso médio; (3) eficiência; (4) estabilidade; e, (5) robustez ao desvanecimento [52]. Em [14], os protocolos de múltiplo acesso usado nos modelos propostos são avaliados quanto à vazão e ao atraso médio.

A vazão é definida como a razão entre o número médio de pacotes transmitidos com sucesso em um canal em um longo período de tempo e o número máximo de pacotes que poderiam ser transmitidos neste canal durante o mesmo intervalo de tempo, considerando situação de geração contínua e ininterrupta de pacotes [52]. De forma semelhante, em [24], a vazão é definida ainda como sendo igual a fração de tempo médio na qual o canal está tomado com transmissão de dados com sucesso dos usuários.

O atraso médio é geralmente o tempo médio decorrido desde o momento em que um pacote é gerado até o momento que ele é transmitido com sucesso através do canal [24] [52]. O atraso médio aqui considerado também é chamado de atraso médio de acesso. Para o cálculo do atraso médio, neste trabalho, são calculadas as probabilidades de transmissão com sucesso de um pacote de interesse em cada uma das janelas de tempo possíveis e, em seguida, é calculado o valor esperado para o número de janelas que se necessita para transmitir com sucesso um pacote na rede.

A eficiência é definida como a fração de tempo em que apenas informação está sendo transmitida ou retransmitida pelo canal. Desta forma, ela é a razão entre o tempo médio consumido dos *slots* para transmitir informação útil e o tempo total de duração da janela [52].

A estabilidade, por sua vez, mostra que um canal é estável se os resultados da vazão e atraso médio estão dentro dos valores esperados, quando é considerado um horizonte de tempo que tende para infinito. Ele é instável quando estes valores médios são alcançados apenas em alguns intervalos finitos de tempo [55]. Na instabilidade, a vazão tende a zero e o atraso médio cresce muito [52].

O canal sem fios é variante no tempo e propenso a erros de transmissão. O desvanecimento no canal pode tornar o enlace instável entre dois usuários por curtos períodos de tempo [52]. A robustez do canal ao desvanecimento afeta a vazão e o atraso médio e o protocolo usado deve ser confiável mesmo na presença de desvanecimento no canal.

2.6.4. Protocolo *Slotted Aloha* e CSMA

A seguir são estudados os protocolos de múltiplo acesso *Slotted Aloha* e CSMA. A razão da escolha destes dois protocolos, quando é sabido que existem inúmeros outros, é exclusivamente para fundamentar o trabalho deste documento.

2.6.4.1. Protocolo *Slotted Aloha*

Nesta técnica de acesso, as estações que possuem dados a serem transmitidos, iniciam a transmissão no início de cada *time slot*, sem se importar com os demais usuários da rede. Após a transmissão do pacote, o receptor confirma se o pacote foi recebido corretamente. Em caso de falha na transmissão, a estação retransmite o pacote após um intervalo aleatório de tempo. O protocolo *Slotted Aloha* foi desenvolvido para aumentar a vazão do protocolo *Aloha* puro, pela introdução de sincronismo entre as estações [50].

Na situação de canal com tráfego dado pela distribuição de Poisson e número infinito de usuários, a vazão máxima alcançada é $S_{op}=0,368$. No modelo usado em [32] e [52], que considera o efeito de captura na rede que usa o protocolo *Slotted Aloha*, a vazão máxima alcançada é $S_{op}=0,53$. Assim sendo, conclui-se que o efeito de captura aumenta a vazão da rede.

2.6.4.2. Protocolos CSMA

Os protocolos CSMA são considerados uma melhoria dos protocolos *Aloha* e podem operar com e sem divisão do tempo em janelas. Neste tipo de protocolo, os usuários escutam o meio antes de iniciar a transmissão e somente enviam

informações através do canal se este é detectado como livre. O protocolo CSMA pode ser classificado em três tipos básicos [50]:

- Não persistente: a estação escuta o meio e transmite assim que possível, caso o canal seja detectado como livre.
- p -persistente: o tempo é dividido em janelas de tempo. Geralmente a duração de cada janela é igual ao atraso de propagação máximo observado na rede em questão. Quando uma estação deseja transmitir dados, ela escuta o meio e, se este estiver livre, ela então pode transmitir com probabilidade p . Quando o usuário não transmite, ele aguarda o início da próxima janela e volta a escutar o canal novamente. Se o canal está livre, o procedimento anterior é repetido; se está ocupado, o rádio tenta transmitir novamente após um atraso aleatório. Caso o meio seja detectado como ocupado quando da primeira tentativa, ele aguarda que o meio fique livre e executa o procedimento anterior.
- 1-persistente: é um caso particular do tipo p -persistente, quando se faz $p=1$.

Nos três tipos de CSMA, quando é necessário realizar uma retransmissão, as estações participantes geram um atraso aleatório antes de escutarem novamente o meio e tentarem a retransmissão [50].

No Capítulo 3 deste trabalho é mostrada uma arquitetura com rede primária e secundária e o seus desempenhos, em termos de vazão e atraso médio, são analisados considerando o modelo original e o novo modelo proposto.

CAPÍTULO 3- ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES DE RÁDIOS COGNITIVOS USANDO *SLOTTED ALOHA*

3.1. Introdução

Neste capítulo estuda-se o desempenho, em termos de vazão e atraso médio, de uma dada arquitetura de rede, analisando-se inicialmente o modelo original, e em seguida é introduzido um novo modelo, que considera a PER devido às interferências nas redes e seus efeitos sobre a vazão e atraso médio das redes analisadas.

Os modelos analisados neste capítulo possuem arquitetura de rede composta por dois grupos: rede primária e rede secundária. A rede primária é uma infraestrutura de rede geralmente já existente em determinado local e que pode ter licença ou não para operar em determinada faixa do espectro de frequências. Neste trabalho, esta rede possui arquitetura centralizada com um ponto de acesso primário (PAP) e N_p usuários primários. Por outro lado, a rede secundária não tem licença para operar na banda desejada e também possui uma arquitetura centralizada com um ponto de acesso secundário (PAS) e N_s usuários secundários [14].

As redes primária e secundária coexistem na mesma região geográfica e na mesma banda de frequência e os usuários primários e secundários acessam suas respectivas estações de rádio base. Os UPs têm prioridade na transmissão de seus pacotes de dados. Os usuários secundários devem realizar suas transmissões com a premissa de evitar ou tornar tolerável a interferência sobre as comunicações dos UPs [14].

Nos modelos estudados neste capítulo é empregado *Slotted Aloha* como protocolo de acesso ao meio para as redes primária e secundária. O desempenho das

redes é calculado levando-se em conta o efeito de captura e o desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh. O novo modelo é uma extensão do modelo original, onde o desempenho da rede é calculado considerando-se adicionalmente a taxa média de erros de pacotes.

O conhecimento da PER em sistemas de comunicação é importante, uma vez que na maioria destes sistemas os dados são transmitidos em pacotes. A ligação entre a PER com o sistema de comunicação dos modelos estudados é feita pela relação sinal/(interferência + ruído) (SINR). Porém, conforme [30], o ruído Gaussiano pode ser negligenciado em canais limitados pela interferência e, sendo assim, neste trabalho é usado o modelo *Signal-to-Interference Ratio* (SIR).

Neste ambiente de rádio cognitivo, os usuários primários e secundários competem por um acesso aleatório ao canal, conforme as regras do *Slotted Aloha*. Em [25] são apresentados dois modelos de acesso espectral cognitivo: acesso espectral oportunista - *Opportunistic Spectrum Access* (OSA) e acesso espectral concorrente - *Concurrent Spectrum Access* (CSA). Neste capítulo é usado o modelo CSA, onde o US coexiste com UP numa determinada banda de frequências e localização. Neste modelo de acesso ao espectro, os USs trabalham com um nível de potência de transmissão menor que o praticado pelos UPs, de tal modo que a interferência causada aos usuários primários fique abaixo de um limite considerado tolerável [25]. Este modelo é chamado de *spectrum underlay* em [56] ou de compartilhamento espectral em [4].

O nível de potência praticada na rede secundária é objeto de muitos estudos que visam a maximizar a vazão e não trazer prejuízos às transmissões dos usuários primários. Em [58] é analisada a questão da potência a ser praticada pelos usuários secundários neste tipo de ambiente baseada no conceito de temperatura de interferência criado pelo SPTF [7] e com uso de espalhamento espectral. Além da questão da interferência sobre o usuário primário, a capacidade do canal é observada também na definição dos limites de potência. No final é proposto e analisado um protocolo de múltiplo acesso baseado na temperatura de interferência - *Interference Temperature Multiple Access* (ITMA). Em [59] é proposto um controle de acesso e

potência dinâmico baseado nas mensagens *Positive/Negative ACKnowledgements* (ACK/NAK) dos usuários primários. O objetivo do trabalho é maximizar o desempenho dos USs e proteger os UPs. Em [49] é afirmado que os usuários secundários devem ser dotados de *interference awareness*. Com esta propriedade cognitiva, eles devem ser capazes de detectar e medir a interferência sobre os usuários primários. Em [60] é proposto o algoritmo *Routing and Spectrum Allocation* (ROSA) que visa a maximizar a vazão da rede secundária e evitar prejuízos às comunicações dos UPs. Uma das partes do ROSA é composta por um problema de programação não linear, onde as potências dos USs é uma das restrições para se maximizar a capacidade de um enlace em uma rede de múltiplos saltos. Em [61] é estudada a quantidade de “compartilhamento espectral ótima” para uma rede secundária, levando em conta o número de usuários e a interferência das redes. O objetivo do estudo é descobrir o número ótimo de USs em relação ao número de UPs que otimiza a vazão total em função de um limite de interferência aceitável ou tolerável. O modo de acesso espectral oportunista (OSA) é estudado em [49], [62], [63] e [64].

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma: na Seção 3.2 é estudado e apresentado o modelo original para o caso onde *Slotted Aloha* é usado tanto na rede primária quanto secundária; na Seção 3.3 é calculada a vazão e o atraso médio para as redes segundo o novo modelo de sistema proposto, que leva em conta a PER nestes cálculos; a Seção 3.4 apresenta os resultados numéricos obtidos para ambos os modelos e compara os seus desempenhos; e a Seção 3.5 apresenta as conclusões deste capítulo.

3.2. Modelo original de sistema

Em [14] são calculados, analisados e simulados a vazão e o atraso médio para a rede primária e secundária e a vazão global das redes. Os cálculos são feitos considerando o desvanecimento por Rayleigh e o efeito de captura.

3.2.1. Arquitetura do modelo original

A Figura 3.1 ilustra a arquitetura usada no modelo original. A rede de rádios cognitivos apresenta dois grupos: rede primária e secundária. Ambas as redes usam *Slotted Aloha* como protocolo MAC.

A rede primária possui N_p usuários primários, sendo que destes, I_p ($0 \leq I_p \leq N_p$) usuários estão tentando transmitir seus pacotes durante um determinado *time slot* do *Slotted Aloha*. Ambas as redes exploram o efeito de captura e possuem arquitetura centralizada, sendo que a rede primária possui um ponto de acesso primário e a secundária, um ponto de acesso secundário. A rede secundária é formada por N_s usuários secundários e durante um dado *time slot* há J_s ($0 \leq J_s \leq N_s$) usuários secundários em tentativa de transmissão de pacotes de dados [14].

A rede primária e secundária coexistem na mesma região geográfica e banda de frequência. O modelo de acesso cognitivo empregado é o CSA, onde os usuários secundários e primários competem pelo acesso espectral, mas os USs trabalham com níveis de potência menores, a fim de evitar ou tornar tolerável a interferência para os UPs [14]. No modelo de tráfego para *Slotted Aloha*, toda vez que um usuário primário ou secundário gera um novo pacote, ele pode transmiti-lo para sua respectiva estação de rádio base no início do *time slot* seguinte. Se o pacote transmitido não é capturado pelo PAP ou PAS, ele é retransmitido nos *time slots* subsequentes.

3.2.2. Modelo de tráfego para a rede primária e secundária

No protocolo *Slotted Aloha* o tempo é dividido em janelas de tempo ou *time slots*. A estação que possui pacote armazenado pode tentar transmiti-lo no início de cada *time slot* sem se importar com as demais. Quando ocorre colisão, o pacote é retransmitido após um atraso aleatório [14] [24].

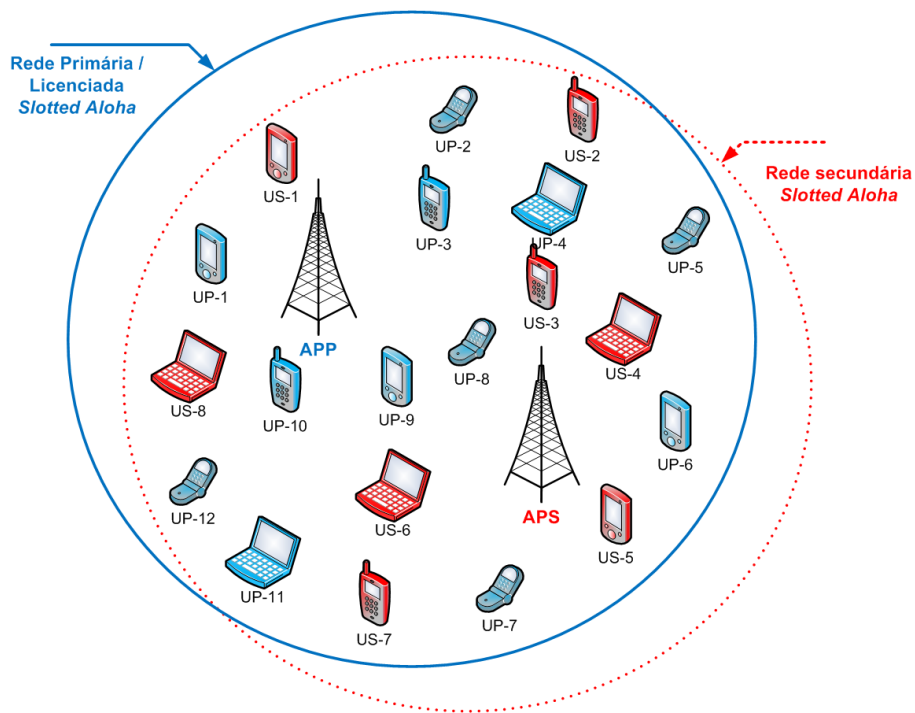


Figura 3.1 – Arquitetura para o modelo original de sistema.

A Figura 3.2 ilustra o modelo de tráfego para a rede primária e secundária. No modelo original, ambas as redes possuem um número finito de usuários e cada um dos usuários pode estar em um dos dois estados possíveis: *thinking* ou *backlogged*. Um usuário está no estado *thinking* quando não tem nenhum pacote em seu *buffer* e não participa de quaisquer atividades de escalonamento. Neste estado, durante um *time slot*, o usuário primário ou secundário pode gerar um novo pacote com probabilidade σ_p ou σ_s , respectivamente. Assim sendo, a probabilidade de que nenhum pacote seja gerado é $(1-\sigma_p)$ ou $(1-\sigma_s)$. A geração de um novo pacote independe de qualquer outra atividade e é, portanto, um processo independente geometricamente distribuído com média $(1/\sigma)$. Uma vez que o pacote é gerado, o usuário tenta transmiti-lo no início do *time slot* seguinte. Se o pacote é transmitido com sucesso, o usuário volta ao estado *thinking*. Caso contrário, vai e permanece no estado *backlogged* [24].

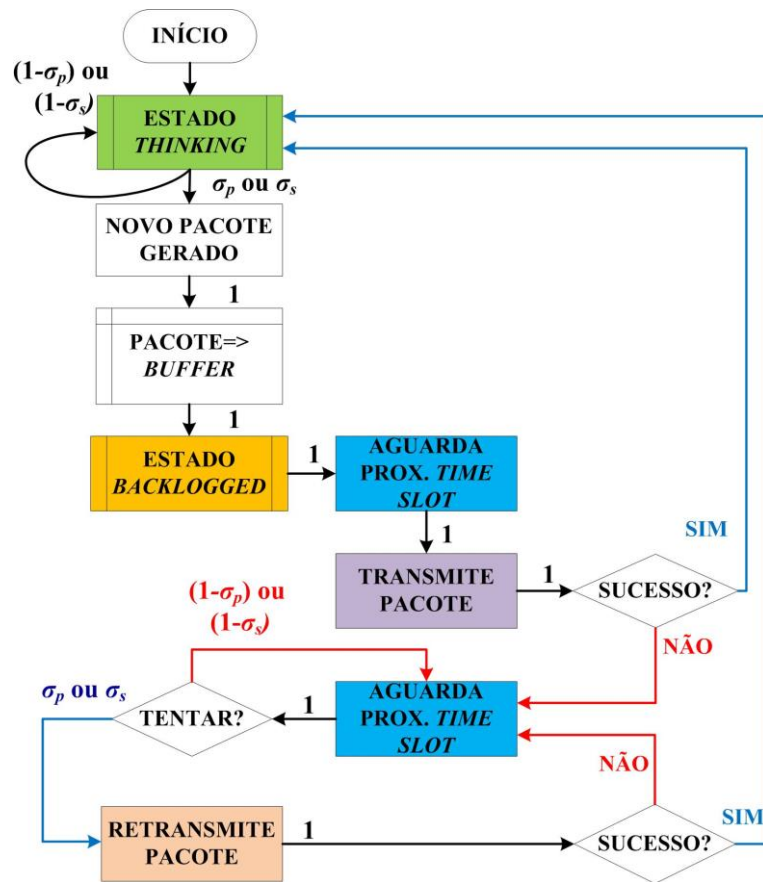


Figura 3.2 – Modelo de tráfego para o protocolo Slotted Aloha.

Um usuário no estado *backlogged* executa a retransmissão do pacote segundo um processo independente geometricamente distribuído com parâmetro σ , conforme assumido em [14]. Neste caso, no início de cada *time slot* subsequente à sua entrada neste estado, o usuário primário ou secundário, poderá retransmiti-lo com probabilidade σ_p ou σ_s , respectivamente, ou não, com probabilidade $(1-\sigma_p)$ ou $(1-\sigma_s)$. Enquanto estiver neste estado, o usuário não pode gerar um novo pacote. Quando o pacote for retransmitido com sucesso, o usuário retorna então ao estado *thinking* [24].

Em [14] a probabilidade de um *time slot* ser usado para transmissão de um novo pacote ou retransmissão é a mesma e igual a σ . Em [24] esta consideração é apontada como uma simplificação matemática razoável para o sistema, isto é, não há distinção entre os usuários em estado de *backlogged* ou *thinking*.

Em [14] são consideradas as interferências das redes e o efeito de captura no cálculo da vazão e do atraso médio. É assumido ainda que os pacotes que chegam ao receptor seguem a distribuição de Bernoulli, pois o sistema é considerado discreto.

3.2.3. Desvanecimento no canal

Considera-se um canal com desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh, cuja função densidade de probabilidade dada por [14]:

$$p_x(x_p) = \frac{1}{X_p} e^{-x_p/X_p}, \quad (3.1)$$

$$p_x(x_s) = \frac{1}{X_s} e^{-x_s/X_s}, \quad (3.2)$$

onde x_p e x_s representam a potência instantânea do sinal do pacote de interesse na rede primária e secundária, respectivamente e, X_p e X_s denotam o valor médio da potência do sinal destes pacotes na rede primária e cognitiva, respectivamente.

Para os sinais dos pacotes interferentes da rede primária e secundária, o desvanecimento no canal pode ser dado conforme as distribuições exponenciais a seguir [14]:

$$p_{y_i}(y_i) = \frac{1}{Y} e^{-y_i/Y}, \quad (3.3)$$

$$p_{z_j}(z_j) = \frac{1}{Z} e^{-z_j/Z}, \quad (3.4)$$

onde y_i e z_j são os valores instantâneos das potências dos sinais dos pacotes interferentes da rede primária e secundária, respectivamente e, Y e Z são os valores

médios das potências dos sinais interferentes na rede primária e cognitiva, respectivamente.

Para os cálculos apresentados em [14] é considerado que $X_p=Y$ e $X_s=Z$ e que a potência praticada pelos rádios da rede primária é maior que a potência dos rádios cognitivos. A relação entre os valores esperados das potências de ambas as redes é representada por γ e é dada por:

$$\gamma = \frac{X_p}{Z} = \frac{Y}{X_s}. \quad (3.5)$$

3.2.4. Efeito de captura

Em [14], considera-se o modelo de captura no qual o sinal interferente corresponde à soma de todas as potências recebidas dos UPs e dos USs, excetuando-se o sinal do pacote de interesse de cada rede, e que se a potência de um pacote de interesse é maior que a potência interferente total e atende ao limiar da razão de captura, o pacote de interesse *captura* o receptor e é recebido corretamente pelo ponto de acesso primário ou pelo ponto de acesso secundário.

3.2.5. Probabilidades de captura

De acordo com o modelo original que considera o efeito de captura, se o pacote de interesse é gerado por um UP, então a sua probabilidade de captura, $P_{pcap \rightarrow PAP}$, é calculada por [14]:

$$P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p, J_s) = \Pr \left(\frac{x_p}{\sum_{i=1}^{I_p-1} y_i + \sum_{j=1}^{J_s} z_j} > R \right), \quad (3.6)$$

onde R é a razão de captura, x_p é a potência instantânea do sinal do pacote de interesse, y_i e z_j são as potências instantâneas interferentes de cada rede, I_p representa

o número de UPs que tentam transmitir seus pacotes durante o *time slot* e J_s denota o número de USs que estão em tentativa de transmissão de dados durante tal *time slot*.

Se o pacote de interesse é originado na rede secundária, então a sua probabilidade de captura, $P_{scap \rightarrow PAS}$, é dada pela equação a seguir [14]:

$$P_{scap \rightarrow PAS}(I_p, J_s) = \Pr \left(\frac{x_s}{\sum_{i=1}^{I_p} y_i + \sum_{j=1}^{J_s-1} z_j} > R \right), \quad (3.7)$$

onde x_s é a potência instantânea do sinal do pacote de interesse gerado por um usuário da rede secundária.

Considerando que todos os usuários da rede primária e secundária são independentes uns dos outros, as funções densidades de probabilidades conjuntas para os sinais de interesse das redes primária e secundária em relação à interferência são, respectivamente [14]:

$$f(x_p, y_1, \dots, y_{I_p-1}, z_1, \dots, z_{J_s}) = \frac{1}{X_p} e^{-\frac{x_p}{X_p}} \times \prod_{i=1}^{I_p-1} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \prod_{j=1}^{J_s} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_j}{Z}}, \quad (3.8)$$

$$f(x_s, y_1, \dots, y_{I_p}, z_1, \dots, z_{J_s-1}) = \frac{1}{X_s} e^{-\frac{x_s}{X_s}} \times \prod_{i=1}^{I_p} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \prod_{j=1}^{J_s-1} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_j}{Z}}, \quad (3.9)$$

onde X_p , X_s , Y e Z são as respectivas potências médias dos sinais do pacotes de interesse e interferentes das redes primária e secundária, respectivamente.

A probabilidade de captura do PAP por um pacote de interesse gerado por um UP pode ser deduzida a partir da Eq.(3.6) e da Eq.(3.8), conforme dado a seguir [14]:

$$\begin{aligned}
P_{p_{cap} \rightarrow PAP}(I_p, J_s) &= \Pr \left(\frac{x_p}{\sum_{i=1}^{I_p-1} y_i + \sum_{j=1}^{J_s} z_j} > R \right) = \\
&= \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{1}{X_p} e^{-\frac{x_p}{X_p}} dx_p \\
&\quad \prod_{i=1}^{I_p-1} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \prod_{j=1}^{J_s} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_j}{Z}} dy_1 \dots dy_{I_p-1} dz_1 \dots dz_{J_s} = \\
&= \left(\frac{X_p}{RY + X_p} \right)^{I_p-1} \left(\frac{X_p}{RZ + X_p} \right)^{J_s} = \\
&= \left(\frac{1}{R+1} \right)^{I_p-1} \left(\frac{\gamma}{R+\gamma} \right)^{J_s}.
\end{aligned} \tag{3.10}$$

A dedução mais detalhada para a Eq.(3.10) pode ser encontrada no Anexo A. A Eq.(3.10) mostra que a probabilidade de captura do PAP pelo pacote de interesse de um UP depende do limiar da razão de captura, da relação entre as potências praticadas na rede primária e secundária e do número de usuários de cada rede que estão tentando transmitir pacotes em um dado *time slot*. Quanto maior R ou o número de usuários competindo durante um *time slot*, menor é essa probabilidade. No caso do número de usuários, essa diminuição se deve ao aumento da interferência das redes. De acordo com [14], para o modelo original quando $I_p=1$ e $J_s=0$, o pacote de UP sempre *captura* o PAP e é recebido corretamente.

De forma análoga, a probabilidade de um PAS ser capturado por um pacote de interesse gerado por um US pode ser deduzida a partir da Eq.(3.7) e da Eq.(3.9) e é mostrada a seguir [14]:

$$\begin{aligned}
P_{scap \rightarrow PAS}(I_p, J_s) &= \Pr \left(\frac{x_s}{\sum_{i=1}^{I_p} y_i + \sum_{j=1}^{J_s-1} z_j} > R \right) = \\
&= \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \int_0^\infty R \left(\sum_{i=1}^{I_p} y_i + \sum_{j=1}^{J_s-1} z_j \right) \frac{1}{X_s} e^{-\frac{x_s}{X_s}} dx_s \\
&\prod_{i=1}^{I_p} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \prod_{j=1}^{J_s-1} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_j}{Z}} dy_1 \dots dy_{I_p} dz_1 \dots dz_{J_s-1} = \\
&= \left(\frac{X_s}{RY + X_s} \right)^{I_p} \left(\frac{X_s}{RZ + X_s} \right)^{J_s-1} = \\
&= \left(\frac{1}{R\gamma + 1} \right)^{I_p} \left(\frac{1}{R + 1} \right)^{J_s-1}.
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Pela Eq.(3.11), pode-se observar que a probabilidade de captura do PAS pelo sinal do pacote do US também depende da razão de captura R , da relação entre as potências praticadas nas redes e do número de usuários de cada rede que estão em tentativa de transmissão durante um *time slot*. Neste caso também, quando $I_p=0$ e $J_s=1$, o sinal do pacote de interesse do US sempre *captura* o PAS.

3.2.6. Cálculo das vazões para o modelo original

A vazão global da rede é definida como o número médio total de pacotes gerados pelos usuários primários e secundários que são recebidos corretamente pelo ponto de acesso primário ou secundário, respectivamente, durante um *time slot* [14].

Para o cálculo da vazão em cada rede é necessário conhecer a probabilidade de que um pacote de interesse dessa rede seja recebido com sucesso pelo seu ponto de acesso. No protocolo *Slotted Aloha* que não considera o efeito de captura, a probabilidade de sucesso é igual à probabilidade de que apenas um usuário destas redes decida transmitir em um dado *time slot*, isto é, não ocorra colisão [24]. Quando se considera o efeito de captura, a probabilidade de sucesso é definida pela probabilidade de que o pacote gerado em uma rede capture o seu ponto de acesso, dado que existe um certo número de usuários destas redes em tentativa de transmissão ou retransmissão durante o *time slot* e pela probabilidade de ocorrência

deste número de usuários de ambas as redes em tentativa de transmissão durante um *time slot*.

Em [14] são definidos quatro possíveis eventos que podem ocorrer durante um *time slot*, conforme a seguir:

- Evento E : um pacote da rede secundária *captura* o PAS e um pacote da rede primária também captura o PAP;
- Evento E_p : apenas um pacote gerado na rede primária é recebido pelo PAP;
- Evento E_s : somente um pacote gerado por um US é recebido pelo PAS;
- Evento $T_{i,j}$: durante um *time slot* há I_p usuários da rede primária ($0 \leq I_p \leq N_p$) e J_s usuários secundários ($0 \leq J_s \leq N_s$) tentando transmitir pacotes.

Definidos os eventos E , E_p , E_s e $T_{i,j}$, é possível calcular a probabilidade de um pacote de interesse da rede primária ser recebido pelo seu ponto de acesso.

A rede primária tem N_p usuários. Durante um *time slot*, I_p usuários primários tentam transmitir um pacote de dados. Seja ainda a probabilidade de captura igual para todos os usuários desta rede, ou seja:

$$P_{pcap \rightarrow PAP}(1) = P_{pcap \rightarrow PAP}(2) = \dots = P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p) = P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p, J_s). \quad (3.12)$$

Onde $P_{pcap-PAP}(i)$ representa a probabilidade do usuário i ser capturado e $P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p, J_s)$ é a probabilidade de um usuário da rede primária ser capturado dado que há (I_p, J_s) usuários primários e secundários disputando um dado *time slot*.

Suponha que durante a ocorrência de um *time slot*, apenas uma estação primária tente transmitir seu pacote, ou seja, $I_p=1$ e $J_s=0$. Neste caso, a probabilidade de que um pacote seja capturado dado que há (I_p, J_s) usuários disputando um *time slot*, $Pr(E_p|T_{I_p,J_s})$, é igual à probabilidade de captura do pacote, $P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p, J_s) = P_{pcap \rightarrow PAP}(1, 0)$, que neste caso, como não há estações interferentes, é igual à unidade, conforme pode ser calculado a partir da Eq.(3.10) e mostrado a seguir:

$$\Pr(E_p | T_{I_p, J_s}) = P_{pcap \rightarrow PAP}(1, 0) = \left(\frac{1}{R+1} \right)^{1-1} \left(\frac{\gamma}{R+\gamma} \right)^0 = 1. \quad (3.13)$$

Seja agora uma situação onde há dois UPs em tentativa de transmissão durante um determinado *time slot*. A probabilidade de captura de um destes usuários pode ser calculada conforme a seguir.

$$\Pr(E_p | T_{I_p, J_s}) = P_{pcap \rightarrow PAP}(1) + P_{pcap \rightarrow PAP}(2) = 2 \cdot P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p, J_s). \quad (3.14)$$

Continuando o raciocínio anterior, a probabilidade condicional de que um pacote seja capturado pelo PAP, dado que (I_p, J_s) usuários estão tentando transmitir num dado *time slot*, pode ser calculada como a seguir [14]:

$$\begin{aligned} \Pr(E_p | T_{I_p, J_s}) &= P_{pcap \rightarrow PAP}(1) + P_{pcap \rightarrow PAP}(2) + \dots + P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p) = \\ &= I_p \cdot P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p, J_s). \end{aligned} \quad (3.15)$$

Finalmente, como os UPs comunicam com o PAP e os USs com o PAS, a probabilidade condicional de captura de um pacote de interesse da rede primária pelo PAP é dada por [14]:

$$\Pr(E_p | T_{i,j}) = i P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p, J_s). \quad (3.16)$$

Onde i e j indicam o número de UPs e USs em tentativa de transmissão durante um *time slot*, respectivamente.

De forma análoga, a probabilidade condicional de que um pacote de interesse gerado por um usuário secundário seja recebido pelo seu ponto de acesso secundário é dado por [14]:

$$\Pr(E_s|T_{i,j}) = jP_{scap \rightarrow PAS}(I_p, J_s). \quad (3.17)$$

E a probabilidade de que o evento E ocorra é igual à soma das probabilidades dadas na Eq.(3.16) e na Eq.(3.17), conforme dado a seguir [14]:

$$\begin{aligned} \Pr(E|T_{i,j}) &= \Pr(E_p|T_{i,j}) + \Pr(E_s|T_{i,j}) = \\ &= iP_{pcap \rightarrow APP}(I_p, J_s) + jP_{scap \rightarrow APS}(I_p, J_s). \end{aligned} \quad (3.18)$$

A probabilidade de que haja i UPs tentando transmitir num dado momento, $P(itx)$, é calculada por [57]:

$$P(itx) = \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1 - \sigma_p)^{N_p - i}, \quad (3.19)$$

onde σ_p é a probabilidade de um UP gerar um novo pacote ou retransmitir um pacote em um dado *time slot*.

De maneira similar, a probabilidade de se ter j USs disputando um *time slot*, $P(jtx)$, pode ser calculada como [57]:

$$P(jtx) = \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1 - \sigma_s)^{N_s - j}. \quad (3.20)$$

onde σ_s é a probabilidade de um US gerar um novo pacote ou retransmitir um num dado *time slot*.

Considerando um *time slot*, a vazão da rede primária, S_{op} , é igual à probabilidade de ter um usuário primário tentando transmitir e nenhum US, *ou* de se ter um UP transmitindo e um US e o usuário primário ser capturado *ou* assim

sucessivamente para as várias combinações possíveis de usuários primários e secundários, conforme mostrado a seguir [14].

$$\begin{aligned}
S_{op} &= \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-j} \cdot \Pr(E_p | T_{i,j}), \\
S_{op} &= \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-j} \cdot i \left(\frac{1}{R+1} \right)^{i-1} \left(\frac{\gamma}{R+\gamma} \right)^j,
\end{aligned} \tag{3.21}$$

onde N_p é o número de UPs, N_s é número de USs, i e j são o número de UPs e USs que estão tentando transmitir pacotes num dado *time slot*, σ_p é a probabilidade de retransmissão ou geração de um novo pacote por um UP, σ_s é a probabilidade de retransmissão ou geração de um novo pacote por um US naquele *time slot*, R é a razão de captura e γ é a relação entre a potência média praticada na rede primária e secundária.

Aplicando o mesmo raciocínio, a vazão da rede secundária para o modelo original, S_{os} , é dada por [14]:

$$\begin{aligned}
S_{os} &= \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-j} \cdot \Pr(E_s | T_{i,j}) \\
S_{os} &= \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-j} \cdot j \left(\frac{1}{R\gamma+1} \right)^i \left(\frac{1}{R+1} \right)^{j-1}.
\end{aligned} \tag{3.22}$$

E a vazão global da rede em análise no modelo original, S_{ot} , é a soma das vazões de cada rede e é calculada como [14]:

$$\begin{aligned}
S_{ot} &= S_{op} + S_{os} \\
S_{ot} &= \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-j} \cdot \\
&\quad \left\{ i \left(\frac{1}{R+1} \right)^{i-1} \left(\frac{\gamma}{R+\gamma} \right)^j + j \left(\frac{1}{R\gamma+1} \right)^i \left(\frac{1}{R+1} \right)^{j-1} \right\}.
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Na Eq. (3.21), na Eq.(3.22) e na Eq.(3.23) considerou-se que os usuários primários e secundários competem pelo acesso ao canal, sendo que a potência praticada pela rede secundária é γ vezes menor que aquela da rede primária, como forma de evitar ou minimizar a interferência sobre os usuários primários.

3.2.7. Cálculo do atraso médio para o modelo original

O atraso médio da rede é definido como o número médio de *time slots* que um pacote leva para ser transmitido com sucesso [14]. Considerando o modelo original como um sistema discreto, para o cálculo do atraso é necessário conhecer a probabilidade de transmissão com sucesso de um pacote de interesse em cada um dos k -ésimos *time slots* que se seguem após sua geração. Estabelecidas tais probabilidades, o passo seguinte é determinar o valor esperado em termos de números de *time slots* que geralmente um pacote de interesse da rede primária ou secundária leva para ser transmitido com sucesso. Este valor esperado representa o atraso médio de cada rede. No modelo original, o atraso médio é calculado considerando o efeito de captura em um canal com interferências e desvanecimento por Rayleigh, conforme as distribuições exponenciais dadas na Eq.(3.1), Eq.(3.2), Eq.(3.3) e Eq.(3.4).

Sejam P_{op} e P_{os} as probabilidades de que um pacote de interesse gerado por um UP ou US, respectivamente, seja transmitido com sucesso no primeiro *time slot* após sua geração ($K_p=1$ e $K_s=1$). Se a primeira transmissão falhar, o pacote será retransmitido nos *time slots* seguintes com probabilidade σ_p ou σ_s , respectivamente, até que se obtenha sucesso nesta operação. Estas probabilidades dependem da probabilidade de captura do pacote de interesse, conforme Eq.(3.10) e Eq.(3.11), e do número de usuários de cada rede que está tentando transmitir ou retransmitir seus pacotes durante um *time slot*. Elas podem ser calculadas conforme as equações a seguir [14]:

$$\begin{aligned}
P_{op} &= \sum_{i=0}^{N_p-1} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p-1}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-1-i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-j} \cdot P_{pcap \rightarrow PAP}(i, j) \\
P_{op} &= \sum_{i=0}^{N_p-1} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p-1}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-1-i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-j} \cdot \left(\frac{1}{R+1}\right)^i \left(\frac{\gamma}{R+\gamma}\right)^j,
\end{aligned} \tag{3.24}$$

onde i e j representam o número de estações interferentes e não o número de estações que estão tentando transmitir pacotes num dado *time slot*, conforme aplicado quando do cálculo da vazão. Neste caso, supõe-se que o usuário gerador do pacote de interesse está em transmissão.

De forma análoga, para a rede secundária, tem-se [14]:

$$\begin{aligned}
P_{os} &= \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s-1} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-i} \binom{N_s-1}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-1-j} \cdot P_{psap \rightarrow PAS}(i, j) \\
P_{os} &= \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s-1} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-i} \binom{N_s-1}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-1-j} \cdot \left(\frac{1}{R\gamma+1}\right)^i \left(\frac{1}{R+1}\right)^j,
\end{aligned} \tag{3.25}$$

onde N_p é o número de usuários primários, N_s é número de usuários secundários, i e j são o número de UPs e USs interferentes de cada rede, σ_p é probabilidade de retransmissão ou geração de um novo pacote por um UP, σ_s é a probabilidade de retransmissão ou geração de um novo pacotes por um US naquele *time slot*, R é a razão de captura e γ é a relação entre as potências médias praticadas na rede primária e na rede secundária.

Sejam agora $P_{op}(K_p=k)$ e $P_{os}(K_s=k)$ as probabilidades de que um pacote de interesse gerado na rede primária ou secundária, respectivamente, seja recebido com sucesso no k -ésimo *time slot* após sua transmissão ($k=1$) ou retransmissão ($k>1$) [14].

A Figura 3.3 mostra o cálculo de tais probabilidades para a rede primária, com $k=1, 2, 3$ e 4.

Da Figura 3.3 pode se obter uma expressão na forma fechada para a probabilidade $P_{op}(K_p=k)$.

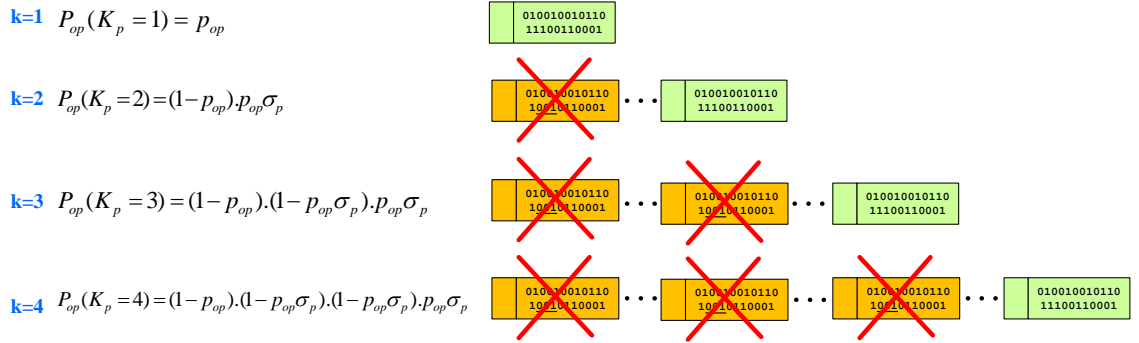


Figura 3.3 - Cálculo da probabilidade $P_{op}(K=k)$, para $k=1, 2, 3$ e 4 .

Sejam K_p e K_s as variáveis aleatórias discretas que definem o número de *time slots* necessários para transmitir um pacote com sucesso na rede primária e na rede secundária, respectivamente. A função massa de probabilidade de K_p é dada por [14]:

$$\begin{cases} P_{op}(K_p = 1) = p_{op} \\ P_{op}(K_p > 1) = (1 - p_{op})(1 - p_{op}\sigma_p)^{k-2} p_{op}\sigma_p, \end{cases} \quad (3.26)$$

onde K_p ($1 \leq K_p \leq k$) é uma variável aleatória discreta e σ_p é probabilidade de retransmissão ou geração de um novo pacote por um UP num dado *time slot*.

De forma análoga, a função massa de probabilidade da variável aleatória K_s é dada por [14]:

$$\begin{cases} P_{os}(K_s = 1) = p_{os} \\ P_{os}(K_s > 1) = (1 - p_{os})(1 - p_{os}\sigma_s)^{k-2} p_{os}\sigma_s. \end{cases} \quad (3.27)$$

Calculando o valor esperado para a variável aleatória K_p com função massa de probabilidade definida na Eq.(3.26), obtém-se o atraso médio para a rede primária, D_{op} , conforme a seguir:

$$E[K_p] = D_{op} = 1 \cdot P_{op} + (1 - p_{op}) p_{op} \sigma_p \left[\sum_{k=2}^{\infty} k (1 - p_{op} \sigma_p)^{k-2} \right]. \quad (3.28)$$

Fazendo $j=k-2$, tem-se:

$$D_{op} = P_{op} + (1 - p_{op})p_{op}\sigma_p \left[\sum_{j=0}^{\infty} (j+2)(1 - p_{op}\sigma_p)^j \right]. \quad (3.29)$$

A Eq.(3.29) converge para:

$$D_{op} = P_{op} + (1 - p_{op})p_{op}\sigma_p \left[\frac{1}{(p_{op}\sigma_p)^2(1 - p_{op}\sigma_p)} - \frac{1}{(1 - p_{op}\sigma_p)} \right]. \quad (3.30)$$

Simplificando a Eq.(3.30), obtém-se o atraso médio para a rede primária, D_{op} , dado por [14]:

$$D_{op} = 1 + \frac{1 - P_{op}}{P_{op}\sigma_p} \quad (3.31)$$

De maneira similar, o atraso médio da rede secundária, D_{os} , é dado por [14]:

$$D_{os} = 1 + \frac{1 - P_{os}}{P_{os}\sigma_s}. \quad (3.32)$$

O atraso médio é dado em número de *time slots*, podendo ser igual ou maior que um e representa o número médio de *time slots* que um pacote de interesse da rede primária ou secundária leva para ser recebido com sucesso. As Eq.(3.31) e Eq.(3.32) mostram que o atraso médio depende do número de usuários das redes, da razão de captura do modelo e da relação entre as potências praticadas na rede. Quanto maior o número de usuários ou maior a potência praticada pelos usuários secundários, maior será a interferência das redes e maior o atraso médio.

3.3. Novo modelo de sistema

Os cálculos da vazão e do atraso médio para o modelo original apresentado em [14] não consideram os efeitos dos erros de transmissão devido aos sinais

interferentes. Nesta seção, apresenta-se uma extensão de tal modelo, levando em conta na análise de desempenho apenas os pacotes recebidos sem erro. Esta abordagem torna o modelo mais realista, pois na maioria das aplicações de sistemas de comunicações, os pacotes recebidos com erro são descartados e retransmitidos.

Para a comparação dos resultados de ambos os modelos, a arquitetura da Figura 3.1 e o modelo de tráfego considerado para o modelo original são considerados também para o novo modelo. A rede primária e secundária usam o protocolo *Slotted Aloha* para acesso ao meio. O desvanecimento no canal segue a distribuição de Rayleigh, conforme a Eq.(3.1), Eq.(3.2), Eq.(3.3) e Eq.(3.4). Para evitar ou tornar os efeitos da interferência toleráveis para os UPs, os rádios da rede secundária operam com níveis de potência menores que os da rede primária, sendo que a relação entre a potência do sinal da rede primária e secundária é definida como γ e apresentada na Eq.(3.5). De acordo com [14], a potência média do sinal do pacote de interesse da rede primária ou secundária (X_p ou X_s) é igual à potência média dos sinais dos pacotes interferentes das redes primária ou secundária (Y ou Z), respectivamente, isto é:

$$\begin{cases} X_p = Y \\ X_s = Z. \end{cases} \quad (3.33)$$

Para o cálculo da vazão e atraso médio considera-se o modelo de captura de [14], no qual o sinal interferente corresponde à soma de todas as potências recebidas dos UPs e dos USs, excetuando-se o sinal do pacote de interesse de cada rede, e que se a potência de um pacote de interesse é maior que a potência interferente total e atende ao limiar da razão de captura, o pacote de interesse captura o receptor e pode ser recebido corretamente pelo PAP ou pelo PAS.

As probabilidades de captura do pacote de interesse da rede primária e secundária são dadas na Eq.(3.10) e na Eq.(3.11), respectivamente.

Nesta seção, são calculadas a vazão e o atraso médio considerando que o canal tenha desvanecimento dado pela distribuição de Rayleigh, o efeito de captura e, diferentemente de [14], a PER devido às interferências das redes.

3.3.1. Cálculo da relação sinal-interferência

No novo modelo, para evoluir no cálculo da vazão e do atraso médio é necessário calcular a PER em função da relação sinal-interferência (SIR). O método escolhido para cálculo da PER é o apresentado em [17] e estudado brevemente na Seção 2.5.2 do Capítulo 2 desse trabalho.

A potência média interferente total da rede é igual à soma de todas as potências médias dos sinais dos pacotes considerados interferentes da rede primária e secundária, excetuando-se a potência do sinal dos pacotes de interesse. Para a rede primária, a potência média interferente total, P_{ip} , pode ser calculada pela equação dada a seguir,

$$P_{ip} = \sum_{i=1}^{I_p-1} Y_i + \sum_{j=1}^{J_s} Z_j. \quad (3.34)$$

Onde Y_i é a potência média do sinal de um pacote interferente da rede primária, Z_j é a potência média do sinal de um pacote da rede secundária e I_p e J_s representam o número de UPs e USs, respectivamente, que estão tentando transmitir durante um *time slot*. De [14], sabe-se que:

$$\begin{aligned} Y_1 &= Y_2 = \dots = Y_{I_p-1} = Y \\ Z_1 &= Z_2 = \dots = Z_{J_s} = Z. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Desta forma, a potência média interferente total na rede primária é dada por:

$$P_{ip} = (I_p - 1)Y + J_s Z. \quad (3.36)$$

De maneira análoga, a potência média interferente total para a rede secundária, P_{is} , é dada por:

$$P_{is} = \sum_{i=1}^{I_p} Y_i + \sum_{j=1}^{J_s-1} Z_j. \quad (3.37)$$

De [14], tem-se que:

$$\begin{aligned} Y_1 = Y_2 = \dots = Y_{I_p} = Y \\ Z_1 = Z_2 = \dots = Z_{J_s-1} = Z. \end{aligned} \quad (3.38)$$

E a potência média interferente total da rede secundária é dada então pela equação a seguir:

$$P_{is} = I_p Y + (J_s - 1)Z. \quad (3.39)$$

O valor médio da relação sinal-interferência da rede primária, Δ_p , é igual à relação entre a potência média do sinal do pacote de interesse desta rede, X_p e a potência média interferente total desta rede, ou seja:

$$\Delta_p = \frac{X_p}{P_{ip}} = \frac{X_p}{(I_p - 1)Y + J_s Z}. \quad (3.40)$$

Dividindo o numerador e o denominador da Eq.(3.40) por X_p , sabendo que em [14] $X_p=Y$ e $\gamma=X_p/Z$, tem-se a SIR para a rede primária, conforme dado a seguir:

$$\begin{aligned} \Delta_p &= \frac{X_p / X_p}{(I_p - 1)Y / X_p + J_s Z / X_p} \\ \Delta_p &= \frac{1}{(I_p - 1) + J_s / \gamma}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Para a rede secundária, a SIR, Δ_s , pode ser calculada através de:

$$\Delta_s = \frac{X_s}{P_{is}} = \frac{X_s}{I_p Y + (J_s - 1)Z}. \quad (3.42)$$

Onde X_s é o valor médio da potência do sinal do pacote de interesse da rede secundária. Dividindo o numerador e o denominador da Eq.(3.42) por X_s , sabendo que em [14] $X_s=Z$ e $\gamma=Y/X_s$, tem-se a SIR para a rede secundária mostrada a seguir:

$$\Delta_s = \frac{1}{\gamma I_p + (J_s - 1)}. \quad (3.43)$$

3.3.2. Taxa média de erro de pacotes no novo modelo

Para o modelo apresentado nesta seção é usada a metodologia apresentada em [17], que permite o cálculo da PER em função da SIR, de maneira relativamente simples, por meio do uso de um limitante superior bastante preciso quando considerado um sistema com desvanecimento com Rayleigh e observada certas restrições, como o tamanho dos pacotes.

Em [17], o canal modelado apresenta desvanecimento quase estático ou lento segundo a distribuição Rayleigh. Neste caso, supõe-se que as condições do canal se mantêm estáveis pelo menos durante o tempo gasto para transmitir um pacote de dados, mas variam independentemente de um pacote para outro [17] [37]. De maneira genérica, isto é, sem importar se a rede analisada é a primária ou a de próxima geração, o canal com desvanecimento por Rayleigh pode ser representado pela distribuição exponencial a seguir [17]:

$$p(\delta) = \frac{1}{\Delta} e^{-\frac{\delta}{\Delta}}. \quad (3.44)$$

Onde δ representa o valor instantâneo da SIR no receptor, Δ é o valor esperado da SIR e $p(\delta)$ a função de densidade de probabilidade da SIR no receptor,

com distribuição exponencial. Para a rede primária, o valor médio da SIR é calculada conforme a Eq.(3.41) e para a rede secundária, conforme a Eq.(3.43).

Seja $f(\delta)$ uma função que relaciona a PER com a SIR instantânea na recepção (δ) em um canal com ruído AWGN. Segundo [17], a PER representada por $P_{ave}(\Delta)$, pode ser calculada pela integral a seguir:

$$P_{ave}(\Delta) = \int_0^{\infty} f(\delta) p(\delta) d\delta. \quad (3.45)$$

Substituindo a Eq.(3.44) na Eq.(3.45), a PER pode ser calculada como [17]:

$$P_{ave}(\Delta) = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\infty} f(\delta) e^{-\delta/\Delta} d\delta. \quad (3.46)$$

De acordo com [17], considerando as técnicas de modulação empregadas, comprimentos de pacotes e esquemas de codificação, a resolução da Eq.(3.46) para o caso geral é difícil. Diante disto é deduzida e analisada uma equação para o cálculo aproximado para a PER baseado em limitante superior, conforme a desigualdade dada a seguir:

$$P_{ave}(\Delta) \leq 1 - e^{-w_0/\Delta}. \quad (3.47)$$

Onde w_0 é um valor constante para o canal com desvanecimento por Rayleigh [17].

Por outro lado, a taxa de sucesso na transmissão de pacotes - *Packet Success Rate* (PSR), $PSR(\Delta)$, pode ser calculada por:

$$PSR(\Delta) \geq 1 - P_{ave}(\Delta)$$

$$PSR(\Delta) \geq 1 - (1 - e^{-w_0/\Delta}) \quad (3.48)$$

$$PSR(\Delta) \geq e^{-w_0/\Delta}.$$

A PER e a PSR podem ser obtidas de forma aproximada conforme as equações apresentadas a seguir:

$$P_{ave}(\Delta) \cong 1 - e^{-w_0/\Delta} \quad (3.49)$$

$$PSR(\Delta) \cong e^{-w_0/\Delta}. \quad (3.50)$$

A referência [17] apresenta uma resolução analítica para limitante superior e as correspondentes simulações para os valores esperados da PER em função da SNR média. A partir dos resultados apresentados em [17], pode-se observar que o limitante superior fornece um valor bastante preciso para a PER sob certas premissas, como por exemplo, quando é utilizada modulação BPSK coerente, com ou sem codificação de canal e para determinados comprimentos de pacote (maior ou igual a 127 [bits] quando a codificação do canal não é usada).

Nas análises realizadas neste trabalho, considera-se modulação BPSK coerente sem codificação de canal e que os pacotes da rede primária e secundária têm comprimento de 127 [bits].

A constante w_0 pode ser calculada pela integral dada a seguir [17]:

$$w_0 = \int_0^{\infty} f(\delta) d\delta \quad (3.51)$$

A Eq.(3.41) é de fácil resolução. Usando o MATLAB, por exemplo, foram encontrados os valores para a constante w_0 , mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores de w_0 para modulação BPSK coerente

Tamanho do pacote n[bits]	Constante w_0
<i>Uncoded</i> 31	2,2364
<i>Uncoded</i> 127	3,4467
<i>Uncoded</i> 1023	5,3361

Considerando um canal de comunicação sem codificação e com pacotes de nb bits, a função $f(\delta)$ pode ser calculada por meio da equação [17]:

$$f(\delta) = \{1 - [1 - b(\delta)]^{nb}\}. \quad (3.52)$$

Onde $b(\delta)$ é a BER do canal. Para a técnica de modulação BPSK, que é a modulação considerada nas análises dos Capítulos 3 e 4 deste trabalho, tem-se [17]:

$$b(\delta) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\delta}). \quad (3.53)$$

Considerando a técnica de modulação digital M -ary *Quadrature Amplitude Modulation* (M-QAM), onde M representa o número de símbolos da constelação, a probabilidade de erro de símbolo, P_{sym} , pode ser calculada por [21]:

$$P_{sym} = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc}(\sqrt{\delta}). \quad (3.54)$$

$$b(\delta) = \frac{P_{sym}}{\log_2(M)}.$$

Onde $b(\delta)$ é a BER para a modulação M-QAM.

3.3.3. Cálculo da vazão para o novo modelo

A vazão global da rede para o novo modelo, denotada por S_{nt} , é definida como o número total de pacotes gerados pelos usuários primários e secundários que são recebidos corretamente pelo ponto de acesso primário ou secundário,

respectivamente, durante um *time slot* [14], considerando agora o efeito de captura e a PER devido às interferências das redes.

A vazão da rede primária, S_{np} , considerando a PER e a PSR dadas na Eq.(3.49) e na Eq.(3.50) e o valor médio da SIR obtida na Eq.(3.41), é dada pela equação a seguir:

$$S_{np} = S_{op} \cdot PSR(\Delta_p) \cong S_{op} \cdot e^{-w_0 \left(I_p^{-1} + \frac{J_s}{\gamma} \right)}. \quad (3.55)$$

Onde S_{op} é a vazão da rede primária para o modelo original, $PSR(\Delta_p)$ é a taxa de sucesso na transmissão dos pacotes da rede primária, Δ_p é o valor médio da SIR na rede primária, w_0 é um valor constante do limitante superior para canais com desvanecimento por Rayleigh, I_p e J_s representam o número de usuários da rede primária e secundária que estão tentando transmitir durante um *time slot* e γ é a relação entre as potências médias da rede primária e secundária.

Para a rede secundária, levando-se em conta o valor médio da SIR apresentado na Eq.(3.43), a vazão S_{ns} é dada por:

$$S_{ns} = S_{os} \cdot PSR(\Delta_s) \cong S_{os} \cdot e^{-w_0 (I_p \gamma + J_s - 1)}. \quad (3.56)$$

Onde, S_{os} é a vazão da rede secundária para o modelo original, $PSR(\Delta_s)$ é a taxa de sucesso na transmissão dos pacotes da rede secundária e Δ_s é o valor médio da SIR na rede secundária.

A vazão global da rede, S_{nt} , é igual à soma das vazões da rede primária e secundária e é dada por:

$$S_{nt} = S_{np} + S_{ns} \quad (3.57)$$

3.3.4. Atraso médio para o novo modelo

Para o novo modelo, o atraso médio é definido como o número médio de *time slots* que um usuário da rede primária ou da rede secundária normalmente gasta para transmitir com sucesso seus respectivos pacotes, considerando o efeito de captura e a PER, devido às interferências das estações das redes.

Sejam p_{np} e p_{ns} as probabilidades de que UP ou US, respectivamente, consigam transmitir com sucesso um pacote de interesse no primeiro *time slot* após sua geração, considerando a PER. Estas probabilidades podem ser calculadas conforme as equações dadas a seguir:

$$p_{np} = p_{op} \cdot PSR(\Delta_p) \quad (3.58)$$

$$p_{ns} = p_{os} \cdot PSR(\Delta_s), \quad (3.59)$$

onde p_{op} e p_{os} são as probabilidades do modelo original de que UP e US, respectivamente, consigam transmitir seus pacotes com sucesso no *time slot* após a sua geração, considerando apenas o efeito de captura e $PSR(\Delta_p)$ e $PSR(\Delta_s)$ representam as taxas médias de transmissão de pacotes com sucesso na rede primária e secundária, considerando a PER.

Substituindo a Eq.(3.41) e a Eq.(3.50) na Eq.(3.58) e a Eq.(3.43) e a Eq.(3.50) na Eq.(3.59), obtém-se:

$$p_{np} \cong p_{op} \cdot e^{-w_0 \left(I_p + \frac{J_s}{\gamma} \right)} \quad (3.60)$$

$$p_{ns} \cong p_{os} \cdot e^{-w_0 (I_p \gamma + J_s)}. \quad (3.61)$$

Sejam K_p e K_s as variáveis aleatórias discretas que definem o número de *time slots* necessários para transmitir um pacote com sucesso na rede primária e na rede secundária, respectivamente. A função massa de probabilidade de K_p é dada por [14]:

$$\begin{cases} P_{np}(K_p = 1) = p_{np} \\ P_{np}(K_p > 1) = (1 - p_{np})(1 - p_{np}\sigma_p)^{k-2} p_{np}\sigma_p, \end{cases} \quad (3.62)$$

onde σ_p é a probabilidade de geração de um novo pacote de dados ou de retransmissão de um pacote por um UP.

Para a rede secundária, seja $P_{ns}(K_s=k)$ a probabilidade de que um pacote de interesse gerado por um US seja recebido com sucesso no k -ésimo *time slot* após sua geração. Então a função massa de probabilidade da variável aleatória K_s é dada por [14]:

$$\begin{cases} P_{ns}(K_s = 1) = p_{ns} \\ P_{ns}(K_s > 1) = (1 - p_{ns})(1 - p_{ns}\sigma_s)^{k-2} p_{ns}\sigma_s, \end{cases} \quad (3.63)$$

onde σ_s é a probabilidade de geração de um pacote por um US ou a sua probabilidade de retransmissão nos *time slots* seguintes a um erro de transmissão.

Calculando o valor esperado para K_p e K_s , obtém-se o atraso médio para a rede primária, D_{np} , e para a rede secundária, D_{ns} , no novo modelo proposto, conforme as equações a seguir [14].

$$D_{np} = E[K_p]$$

$$D_{np} = 1 + \frac{1 - p_{np}}{p_{np}\sigma_p} \quad (3.64)$$

$$D_{ns} = E[K_s]$$

$$D_{ns} = 1 + \frac{1 - p_{ns}}{p_{ns}\sigma_s}. \quad (3.65)$$

Onde $E[.]$ representa o valor esperado de uma variável aleatória.

Substituindo a Eq.(3.60) na Eq.(3.64), obtém-se a equação final para o atraso médio da rede primária segundo o novo modelo de sistema proposto.

$$D_{np} \cong 1 + \frac{1 - p_{op} \cdot e^{-w_0(I_p - 1 + J_s/\gamma)}}{p_{op} \cdot e^{-w_0(I_p - 1 + J_s/\gamma)} \cdot \sigma_p}. \quad (3.66)$$

Para a rede secundária, substituindo a Eq.(3.61) na Eq.(3.65), o atraso médio conforme o novo modelo é dado por:

$$D_{ns} \cong 1 + \frac{1 - p_{os} \cdot e^{-w_0(I_p \gamma + J_s - 1)}}{p_{os} \cdot e^{-w_0(I_p \gamma + J_s - 1)} \cdot \sigma_s}. \quad (3.67)$$

3.4. Resultados numéricos

Nesta seção são mostrados e comparados os resultados numéricos obtidos para o novo modelo. Estes resultados são defrontados com os do modelo original que não considera o efeito da PER devido às interferências das redes. Para que tal comparação fosse possível, os parâmetros e considerações usadas para traçar os gráficos de vazão e atraso médio para o novo modelo foram os mesmos usados no modelo original.

Os gráficos são traçados em função da carga oferecida na rede primária e em função das probabilidades de geração e retransmissão de pacotes na rede primária, σ_p , e cognitiva, σ_s .

A carga da rede primária é calculada conforme a equação a seguir [14]:

$$G_p = N_p \cdot \sigma_p. \quad (3.68)$$

Onde N_p é o número total de usuários primários.

Em [14], o desempenho das redes também depende das probabilidades de geração e retransmissão de pacotes em cada uma das redes. Seja m a razão entre a probabilidade de geração ou retransmissão de um pacote da rede secundária, σ_s , e a probabilidade de geração e retransmissão de um pacote na rede primária, σ_p , conforme a seguir:

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_p}. \quad (3.69)$$

O fator m é uma espécie de *fator de gulosidade*, isto é, ele mede quão gulosos são os rádios da rede secundária por *time slots*. Quanto maior m , maior a probabilidade de um US gerar um novo pacote e maior a probabilidade de tentativa de retransmissão de um pacote da rede secundária em um dado *time slot*.

Os gráficos para a vazão da rede primária e secundária e a vazão global da rede são apresentados na Figura 3.4, na Figura 3.5 e na Figura 3.6, respectivamente, e o atraso médio para a rede primária e secundária é mostrado na Figura 3.7 e na Figura 3.8. Todos os gráficos foram traçados considerando: (1) Modelo original e (2) Novo modelo. Foi levada em conta modulação BPSK coerente, sem codificação de canal e com pacotes de 127 [bits]. Para comparação dos resultados entre o novo modelo e o original, foram considerados os mesmos parâmetros de [14]: $N_p = N_s = 30$, $\gamma = 10$, $R=3$ [dB] e $m = 1, 2$ e 5 .

Pelos gráficos apresentados nesta seção, pode-se observar que a PER interfere significativamente sobre o desempenho das redes e, portanto, não poderia ser ignorada nos cálculos, como ocorre em [14]. Considerando a PER, houve uma sensível redução da vazão da rede primária, da rede secundária e da vazão global do sistema quando se compara os dados do novo modelo e do modelo original. Para o atraso médio, quando se leva em conta a PER, observa-se que este parâmetro de desempenho aumenta consideravelmente. De forma geral, com a introdução da PER há uma substancial piora dos desempenhos das redes.

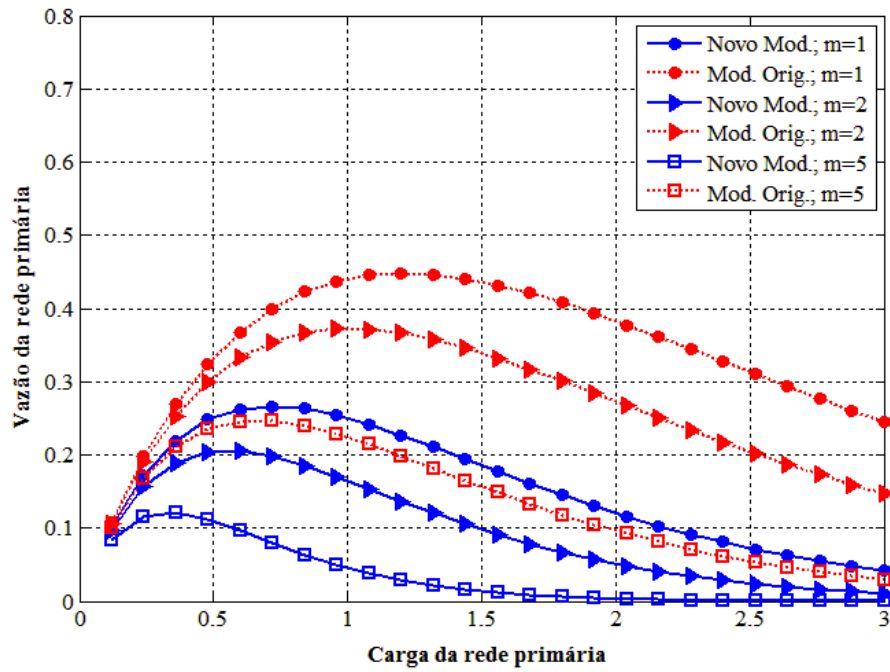


Figura 3.4 – Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original ($N_p=N_s=30$, $\gamma=10$, $R=3dB$).

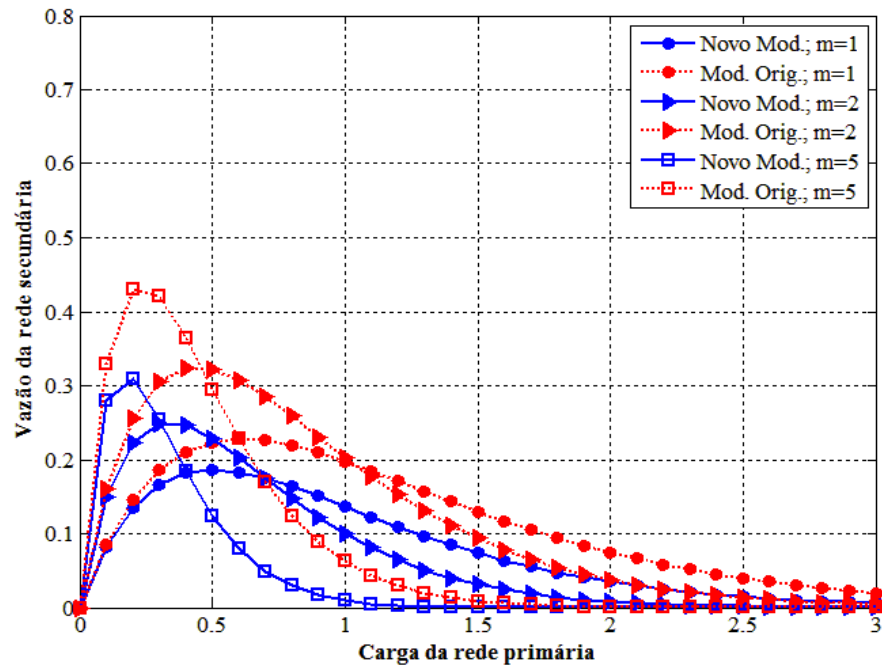


Figura 3.5 – Vazão da rede secundária: comparação entre os modelos novo e original ($N_p=N_s=30$, $\gamma=10$, $R=3dB$).

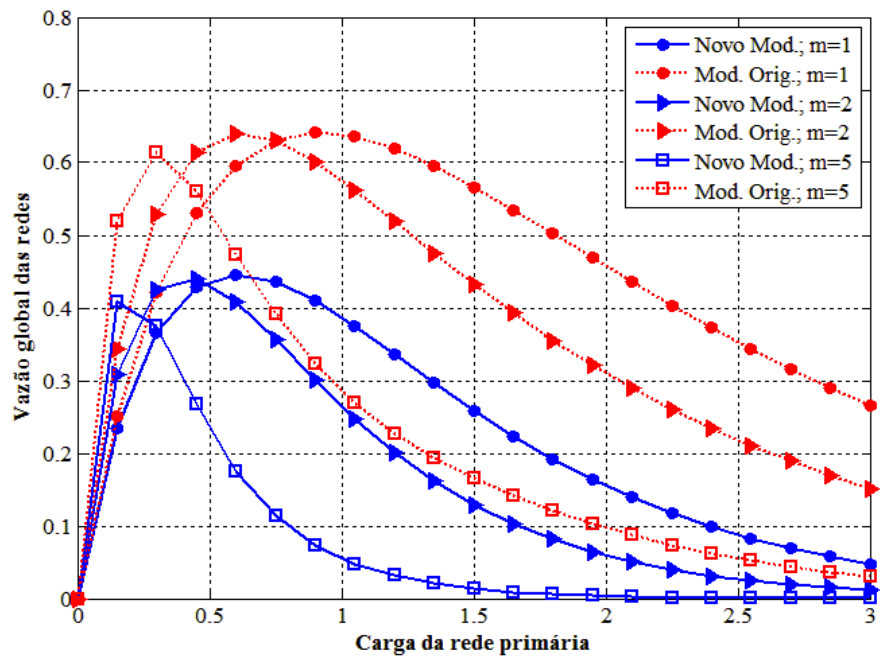


Figura 3.6 – Vazão global das redes: comparação entre os modelos novo e original ($N_p=N_s=30$, $\gamma=10$, $R=3dB$).

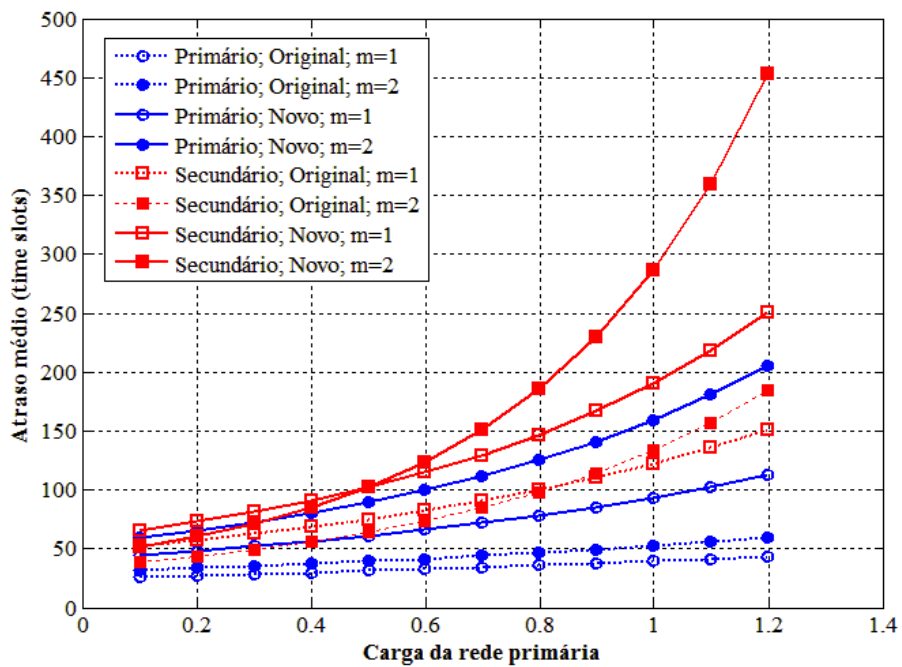


Figura 3.7 – Atraso médio: comparação entre os modelos novo e original ($N_p=N_s=30$, $\gamma=10$, $R=3dB$, $m=1, 2$).

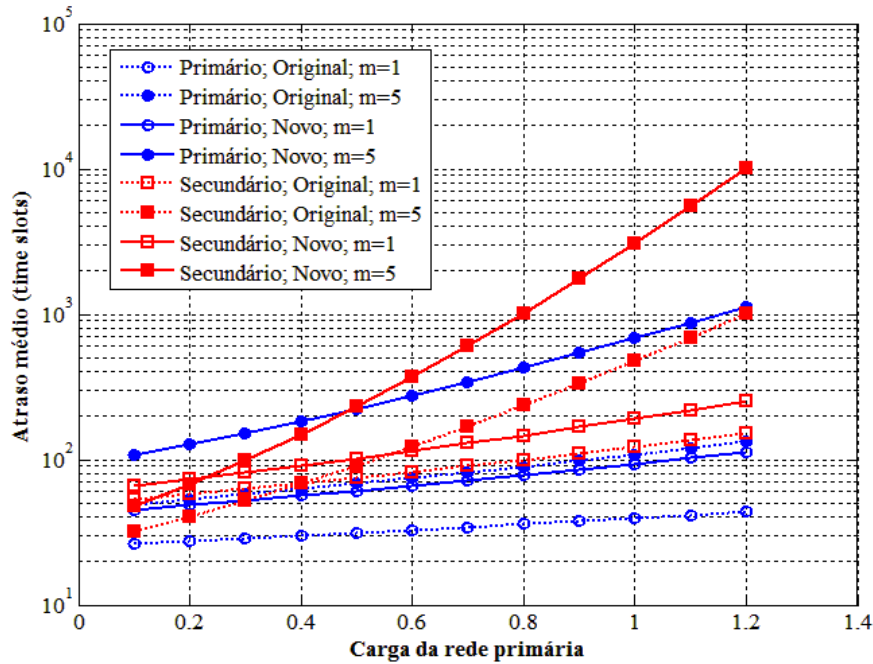


Figura 3.8 – Atraso médio: comparação entre os modelos novo e original ($N_p=N_s=30$, $\gamma=10$, $R=3dB$, $m=1, 5$).

3.5. Conclusão

Neste capítulo foi estudado o modelo original de sistema, onde a rede primária e a rede secundária usam o protocolo *Slotted Aloha* para acesso ao meio. Neste modelo, o desempenho das redes, em termo de vazão e atraso médio, é calculado considerando o efeito de captura e o desvanecimento do canal conforme a distribuição de Rayleigh.

Estendendo o trabalho apresentado em [14], um novo modelo para o sistema foi proposto e analisado. Neste novo modelo, a vazão e o atraso médio são calculados considerando os efeitos da PER devido às interferências das redes. Assim como ocorre no modelo original, o efeito de captura e o desvanecimento por Rayleigh também foram levados em conta em tais cálculos.

Para o cálculo da PER foi considerado o limitante superior bastante preciso apresentado em [17], que foi validado, pelos proponentes do limitante, por comparação entre os resultados numéricos e simulações.

Os resultados encontrados para o novo modelo mostram uma sensível piora no desempenho do sistema quando se considera a PER, devido às interferências das redes. As vazões da rede primária e da rede secundária, bem como a vazão global do sistema diminuem consideravelmente quando se considera a PER. Com relação aos atrasos médios de cada rede, verifica-se um crescimento considerável para ambas as redes. Assim sendo, o efeito da PER não pode ser ignorado nos cálculos, como acontece em [14].

Como estudo futuro, mecanismos de controle de erros podem ser analisados como forma de diminuir os efeitos da PER e melhorar o desempenho do sistema em termos de vazão e atraso médio. Além disso, técnicas de otimização poderiam ser analisadas para adequar os níveis de potência praticados pelos usuários secundários, como forma de melhorar o desempenho do sistema e diminuir as interferências das redes.

O Capítulo 4, mostrado a seguir, apresenta outra arquitetura de rede, onde a rede secundária usa o protocolo *Slotted CSMA*. As vazões das redes e o atraso médio da rede primária são analisados considerando o modelo original e o novo modelo. Adicionalmente, um método para calcular o atraso médio da rede secundária é apresentado e validado por simulação de computador.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES DE RÁDIOS COGNITIVOS USANDO *SLOTTED* CSMA

4.1. Introdução

O objetivo deste capítulo é estudar o desempenho de uma arquitetura que possui uma rede primária que usa *Slotted Aloha* como protocolo de acesso ao meio e uma rede secundária com o protocolo *Slotted CSMA*. Assim como ocorre no Capítulo 3, aqui também é proposto um novo modelo de sistema, considerado uma extensão do modelo original, que leva em conta a PER devido às interferências das redes e é analisado o impacto da taxa de erros de pacotes sobre o desempenho das redes e sobre o desempenho global das redes da arquitetura.

Tanto no modelo original estudado quanto no novo modelo proposto, a vazão das redes primária e secundária e a vazão global das redes são analisadas, o mesmo ocorrendo com o atraso médio da rede primária.

Diferentemente dos modelos estudados e analisados no Capítulo 3, a soma das potências dos sinais dos pacotes interferentes dos modelos propostos neste capítulo tende a ser menor, uma vez que os usuários secundários somente podem transmitir quando o espectro está ocioso.

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma: na Seção 4.2 apresenta-se e caracteriza-se o modelo original; na Seção 4.3 analisa-se o desempenho da rede primária para o modelo original, em termos de vazão e atraso médio; a Seção 4.4 apresenta o cálculo da vazão para a rede secundária, conforme o modelo original; na Seção 4.5 mostra-se a análise da vazão global das redes; a Seção

4.6 define o novo modelo proposto e calcula a SIR e a PER das redes analisadas; na Seção 4.7 calculam-se a vazão e o atraso médio da rede primária para o modelo novo, que considera a PER; a Seção 4.8 traz a análise de vazão da rede secundária segundo o modelo novo; a Seção 4.9 apresenta o cálculo da vazão global das redes de acordo com o novo modelo; a Seção 4.10 mostra os gráficos com resultados numéricos para a vazão das redes e a vazão global, tanto para o modelo original, quanto para o novo modelo; a Seção 4.11 mostra os gráficos resultantes do cálculo numérico para o atraso médio na rede primária; a Seção 4.12 apresenta um método para cálculo do atraso médio da rede secundária; na Seção 4.13, mostra-se o resultado do cálculo numérico e da simulação em forma de gráficos para análise do atraso médio da rede secundária, considerando ou não a PER; e, na Seção 4.14, a conclusão do capítulo é apresentada.

4.2. Modelo original

Nesta seção apresenta-se o modelo original. A Figura 4.1 ilustra a arquitetura deste modelo. No novo modelo também é considerada a mesma arquitetura de redes mostrada na Figura 4.1. Os protocolos MAC conhecidos como *Slotted Aloha* e *Slotted CSMA* são usados, respectivamente, na rede primária e secundária. Ambas as redes possuem pontos de acesso, possuindo então arquitetura centralizada. Os UPs comunicam com o ponto de acesso primário (PAP) e todos os usuários desta rede podem ver seu ponto de acesso e vice-versa. A rede primária possui N_p usuários primários no total, sendo que I_p usuários ($0 \leq I_p \leq N_p$) deste total estão tentando transmitir seus pacotes num determinado *time slot*. A rede secundária é composta por um ponto de acesso secundário (PAS) e possui N_s usuários secundários, sendo que num determinado *time slot* ocioso da rede primária, há J_s usuários ($0 \leq J_s \leq N_s$) tentando transmitir seus pacotes de dados. Todos os UPs estão na região de alcance do PAS e vice-versa [14].

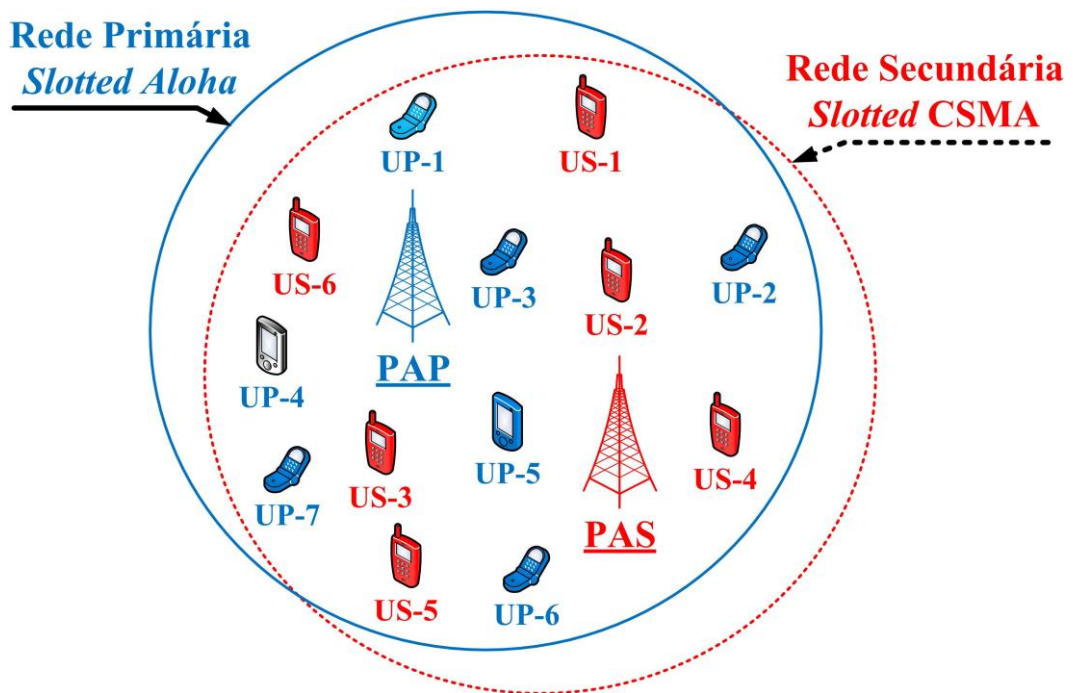


Figura 4.1 - Arquitetura das redes para o modelo original.

Os UPs têm prioridade para transmitir seus pacotes de dados e, portanto, os USs devem monitorar o canal para evitar interferências com os UPs e identificar claramente e rapidamente os buracos espectrais que surgem quando a rede primária está ociosa [14].

A Figura 4.2 mostra a estrutura de *time slots* das redes primária e cognitiva. Cada *time slot* é classificado como ocupado ou ocioso, dependendo dos estados de transmissão dos UPs durante as sucessivas janelas de tempo. Se não houver nenhum UP tentando transmitir no início de um *time slot* da rede primária, ele é considerado ocioso e esta oportunidade espectral pode ser explorada pelos USs [14].

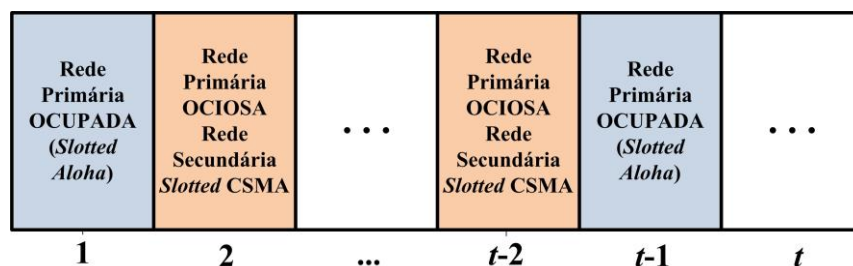


Figura 4.2 - Estrutura de *time slot* para o modelo original.

4.3. Análise do desempenho da rede primária para o modelo original

A rede primária segue o mesmo modelo de tráfego apresentado na Seção 3.2.2. No início de um *time slot*, o UP em estado *thinking* pode gerar um novo pacote com probabilidade σ_p . Assim sendo, a probabilidade de que nenhum pacote seja gerado é $(1-\sigma_p)$. Uma vez que o pacote é gerado, o usuário tenta transmiti-lo no início do *time slot* seguinte. Se o pacote é transmitido com sucesso, o usuário retorna ao estado *thinking*. Caso contrário, vai e permanece no estado *backlogged* [24].

Um usuário no estado *backlogged* pode retransmitir o pacote, no início de cada *time slot* subsequente à sua entrada nesse estado, com probabilidade σ_p , ou não, com probabilidade $(1-\sigma_p)$. Enquanto estiver nesse estado, o usuário não pode gerar um novo pacote. Quando o pacote for retransmitido com sucesso, o usuário retorna então ao estado *thinking* [24].

4.3.1. Análise do desvanecimento na rede primária

No modelo de tráfego é considerado um canal com desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh, conforme a função de distribuição de probabilidade apresentada na Eq.(2.4) da Seção 2.2.1 e na Seção 3.2.3, e reproduzida a seguir:

$$p_x(x_p) = \frac{1}{X_p} e^{-x_p/X_p}, \quad (4.1)$$

$$p_{y_i}(y_i) = \frac{1}{Y} e^{-y_i/Y}, \quad (4.2)$$

onde x_p é o valor instantâneo da potência do sinal do pacote de interesse da rede primária, y_i é a potência instantânea dos sinais dos pacotes considerados interferentes nesta rede, X_p e Y são os valores médios das potências dos sinais dos pacotes de interesse e interferentes da rede primária. Em [14], é considerado que $X_p=Y$.

4.3.2. Efeito de captura da rede primária

O efeito de captura no protocolo *Slotted Aloha* ocorre devido ao fato de que os sinais que chegam ao receptor apresentam diferentes níveis de potência [14] [32]. Se a potência do sinal do pacote de interesse é maior que a soma dos sinais dos pacotes interferentes e atende à razão de captura (R), então o sinal do pacote de interesse pode *capturar* o PAP [14].

De acordo com [14], a probabilidade de captura, $P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p)$, do sinal de um pacote de interesse é calculada conforme dado a seguir:

$$P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p) = \Pr \left(\frac{x_p}{\sum_{i=1}^{I_p-1} y_i} > R \right), \quad (4.3)$$

onde I_p representa o número de UPs que estão tentando transmitir um pacote de dados no início de um *time slot* da rede primária, x_p é a potência instantânea do sinal do pacote de interesse, y_i é o valor instantâneo da potência dos sinais dos pacotes interferentes e R é a razão de captura [14].

Assumindo que todos os UPs são independentes uns dos outros, obtém-se a função de distribuição de probabilidade conjunta para o sinal de interesse da rede primária em relação à sua interferência conforme abaixo [14]:

$$f(x_p, y_1, \dots, y_{I_p-1}) = \frac{1}{X_p} e^{-\frac{x_p}{X_p}} \times \prod_{i=1}^{I_p-1} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}}, \quad (4.4)$$

onde X_p e Y representam o valor esperado da potência dos sinais dos pacotes de interesse e interferentes, respectivamente. A partir da Eq.(4.3) e da Eq.(4.4), em [14] é calculada a probabilidade de captura do pacote de interesse de um UP, conforme abaixo.

$$\begin{aligned}
P_{pacap \rightarrow PAP}(I_p) &= \Pr\left(\frac{x_p}{\sum_{i=1}^{I_p-1} y_i} > R\right) = \\
&= \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \int_R(\sum_{i=1}^{I_p-1} y_i) \frac{1}{X_p} e^{-\frac{x_p}{X_p}} dx_p \prod_{i=1}^{I_p-1} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} dy_1 \dots dy_{I_p-1} = \\
&= \left(\frac{X_p}{RY + X_p}\right)^{I_p-1} = \left(\frac{1}{R+1}\right)^{I_p-1}.
\end{aligned} \tag{4.5}$$

A Eq.(4.5) mostra que a probabilidade de captura do PAP pelo pacote de interesse de um UP depende do limiar da razão de captura e do número de usuários da rede que estão tentando transmitir seus pacotes em um dado *time slot*. Quanto maior R ou o número de usuários competindo durante um *time slot*, menor é essa probabilidade. No caso do número de usuários, a diminuição da probabilidade ocorre devido ao aumento da interferência da rede. De acordo com o modelo original, quando $I_p=1$, o pacote de UP sempre *captura* o PAP e é recebido corretamente.

4.3.3. Cálculo da vazão da rede primária para o modelo original

Em [14] a vazão da rede primária, S_{op} , é definida como o número médio de pacotes transmitidos com sucesso pelos UPs para o PAP durante um *time slot*.

Quando não se considera o efeito de captura, a probabilidade de que um pacote seja transmitido com sucesso depende do número de usuários que estão tentando transmitir no início de um *time slot*. Se esse número for maior que um, ocorre colisão, os usuários falham no acesso ao meio e os pacotes são retransmitidos. O sucesso, nesse caso, somente ocorre quando apenas um usuário está tentando transmitir no início de *time slot*. Quando se considera o efeito de captura, a probabilidade de sucesso é igual àquela de que o pacote de interesse *capture* o PAP, dado que existe I_p usuários tentando transmitir no início de um *time slot*.

Na arquitetura de rede dada em [14] para o modelo original são considerados dois eventos possíveis quando ocorre um *time slot*.

- Evento E_p : o PAP recebe com sucesso um pacote gerado nesta rede.
- Evento T_{I_p} : num dado *time slot*, há I_p usuários primários tentando transmitir um pacote de dados para o PAP.

Considerando que as probabilidades de captura, $P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p)$, para cada um dos I_p usuários desta rede, que estão em tentativa de transmissão, são iguais e levando em consideração que os usuários secundários podem detectar a presença de portadora no canal e, portanto, não causam interferências na rede primária, tem-se:

$$P_{pcap \rightarrow PAP}(1) = P_{pcap \rightarrow PAP}(2) = \dots = P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p). \quad (4.6)$$

Assumindo que durante a ocorrência de um *time slot* ocioso, apenas uma estação tenta transmitir seu pacote, ou seja, $I_p=1$. Nesse caso, a probabilidade de que um pacote seja capturado dado que há I_p usuários disputando um *time slot* ocioso, $Pr(E_p/T_{I_p})$, é igual à probabilidade de captura do pacote, $P_{pcap \rightarrow PAP}(1)$, que nesse caso, como não há estações interferentes, é igual à unidade, conforme pode ser calculado a partir da Eq.(4.5) e mostrado abaixo:

$$Pr(E_p | T_{I_p}) = P_{pcap \rightarrow PAP}(1) = \left(\frac{1}{R+1} \right)^{1-1} = 1. \quad (4.7)$$

Seja agora o mesmo contexto acima, porém com dois UPs tentando transmitir seus pacotes. A probabilidade de sucesso é igual à soma das probabilidades de captura de cada uma das estações, ou seja:

$$Pr(E_p | T_{I_p}) = P_{pcap \rightarrow PAP}(1) + P_{pcap \rightarrow PAP}(2) = 2 \cdot P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p). \quad (4.8)$$

Continuando o raciocínio anterior, a probabilidade condicional de que um pacote seja capturado pelo PAP, dado que I_p usuários estão tentando transmitir num dado *time slot* ocioso, pode ser calculada como a seguir [14]:

$$\Pr(E_p | T_{I_p}) = P_{pcap \rightarrow PAP}(1) + P_{pcap \rightarrow PAP}(2) + \dots + P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p). \quad (4.9)$$

E finalmente, como apresentado em [14]:

$$\Pr(E_p | T_{I_p}) = I_p \cdot P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p). \quad (4.10)$$

De acordo com [57], a probabilidade de que um ou mais UPs transmitam ao mesmo tempo, $P(I_p tx)$, pode ser calculada por:

$$P(I_p tx) = \binom{N_p}{I_p} \sigma_p^{I_p} (1 - \sigma_p)^{N_p - I_p}, \quad (4.11)$$

onde N_p é o número total de UPs da rede primária e σ_p é a probabilidade de uma estação no estado *thinking* gerar um novo pacote ou de um usuário no estado *backlogged* retransmitir e I_p é o número de UPs que estão disputando um *time slot*.

Para calcular a vazão da rede primária é necessário calcular a probabilidade de captura do pacote de interesse pelo PAP dado que há I_p usuários tentando transmitir simultaneamente seus pacotes, dada pela Eq.(4.10), e a probabilidade de se ter I_p usuários transmitindo de uma população formada por N_p estações, conforme a Eq.(4.11). Esta probabilidade conjunta é a probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote na rede primária. A vazão será então a soma das probabilidades de sucesso para todas as combinações de estações transmissoras possíveis. Diante do exposto anteriormente, a vazão da rede primária para o modelo original, S_{op} , é calculada como a seguir [14]:

$$\begin{aligned} S_{op} &= \sum_{i=0}^{N_p} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1 - \sigma_p)^{N_p - i} \cdot \Pr(E_p | T_{I_p}), \\ S_{op} &= \sum_{i=0}^{N_p} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1 - \sigma_p)^{N_p - i} \cdot i \cdot \left(\frac{1}{R+1} \right)^{i-1}, \end{aligned} \quad (4.12)$$

onde N_p é o número total de usuários primários, i é o número de UPs que estão tentando transmitir pacotes num dado *time slot*, σ_p é a probabilidade de retransmissão ou geração de um novo pacote por um UP e R é a razão de captura.

4.3.4. Cálculo do atraso médio da rede primária para o modelo original

O atraso médio da rede primária é definido como o número médio de *time slots* que um pacote leva para ser transmitido com sucesso [14].

Em [14], para calcular o atraso médio é considerado que o pacote de interesse é gerado pelo usuário escolhido da rede e então são determinadas as probabilidades de captura do pacote de interesse pelo PAP no primeiro *time slot* após sua geração e as probabilidades de retransmissão com sucesso nos *time slots* seguintes. Em seguida é calculado o valor esperado, em termos de *time slots*, que um pacote leva para ser transmitido na rede primária, considerando o efeito de captura e desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh.

Seja P_{op} a probabilidade de que um pacote de interesse gerado por um UP seja transmitido com sucesso no primeiro *time slot* após sua geração ($K_p=1$). Se a primeira transmissão falhar, o pacote será retransmitido nos *time slots* seguintes com probabilidade σ_p , até que se obtenha sucesso nesta transmissão. Esta probabilidade depende da probabilidade de captura do pacote de interesse, que pode ser calculada pela Eq.(4.5), e do número de usuários primários que estão tentando transmitir ou retransmitir seus pacotes durante um *time slot*. Ela pode ser calculada conforme a equação a seguir [14]:

$$\begin{aligned}
 P_{op} &= \sum_{i_i=0}^{N_p-1} \binom{N_p-1}{i_i} \sigma_p^{i_i} (1-\sigma_p)^{N_p-1-i_i} \cdot P_{pcap \rightarrow PAP}(i_i) \\
 P_{op} &= \sum_{i_i=0}^{N_p-1} \binom{N_p-1}{i_i} \sigma_p^{i_i} (1-\sigma_p)^{N_p-1-i_i} \cdot \left(\frac{1}{R+1} \right)^{i_i},
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

onde N_p é o número de usuários primários, i_i representa o número de estações interferentes e não o número de estações que estão tentando transmitir pacotes num

dado *time slot*, σ_p é a probabilidade de retransmissão ou geração de um novo pacote por um UP e R é a razão de captura.

Seja agora $P_{op}(K_p=k)$ a probabilidade de que um pacote de interesse gerado na rede seja recebido com sucesso no k -ésimo *time slot* após sua transmissão (se $k=1$) ou retransmissão (se $k>1$) [14].

De acordo com [14], pode se obter uma expressão na forma fechada para a probabilidade, $P_{op}(K_p=k)$, conforme dado a seguir:

$$\begin{cases} P_{op}(K_p = 1) = p_{op} \\ P_{op}(K_p > 1) = (1 - p_{op})(1 - p_{op}\sigma_p)^{k-2} p_{op}\sigma_p, \end{cases} \quad (4.14)$$

onde K_p , ($1 \leq K_p \leq k$), é uma variável aleatória discreta que indica em qual *time slot* o pacote de interesse foi transmitido com sucesso, σ_p é a probabilidade de retransmissão ou geração de um novo pacote por um UP num dado *time slot*.

Calculando o valor esperado para a variável aleatória K_p com função massa de probabilidade dada na Eq.(4.14), obtém-se o atraso médio para a rede primária para o modelo original, D_{op} , conforme dado a seguir:

$$E[K_p] = D_{op} = 1 \cdot P_{op} + (1 - p_{op})p_{op}\sigma_p \left[\sum_{k=2}^{\infty} k(1 - p_{op}\sigma_p)^{k-2} \right]. \quad (4.15)$$

Fazendo $j=k-2$, tem-se:

$$D_{op} = P_{op} + (1 - p_{op})p_{op}\sigma_p \left[\sum_{j=0}^{\infty} (j+2)(1 - p_{op}\sigma_p)^j \right]. \quad (4.16)$$

A Eq.(4.16) converge para:

$$D_{op} = P_{op} + (1 - p_{op})p_{op}\sigma_p \left[\frac{1}{(p_{op}\sigma_p)^2(1 - p_{op}\sigma_p)} - \frac{1}{(1 - p_{op}\sigma_p)} \right]. \quad (4.17)$$

Simplificando a Eq.(4.17), obtém-se que o atraso médio para a rede primária é dado por [14]:

$$D_{op} = 1 + \frac{1 - P_{op}}{P_{op}\sigma_p}. \quad (4.18)$$

4.4. Análise do desempenho para a rede secundária no modelo original

A arquitetura das redes para o modelo original é mostrada na Figura 4.1. A rede secundária possui N_s usuários e durante a ocorrência de um *time slot* detectado como ocioso na rede primária, pode haver J_s usuários tentando transmitir um pacote de dados [14].

Em [14] é assumido que os usuários secundários podem *escutar* o canal e determinar se o canal está ocupado ou ocioso em um dado instante.

4.4.1. Estrutura de *mini-slots*

Na rede secundária do modelo original é usado *Slotted CSMA* como protocolo de acesso ao meio e a estrutura de *mini-slots* para esta rede é ilustrado na Figura 4.3 [14].

No topo da Figura 4.3 é mostrada a estrutura de *time slots* da rede primária que usa o protocolo *Slotted Aloha*. Nesse caso exemplificado, o primeiro e o terceiro *time slots* estão ocupados pelos UPs. O segundo e quarto, por sua vez, representam oportunidades espectrais que podem ser exploradas pelos USs [14].

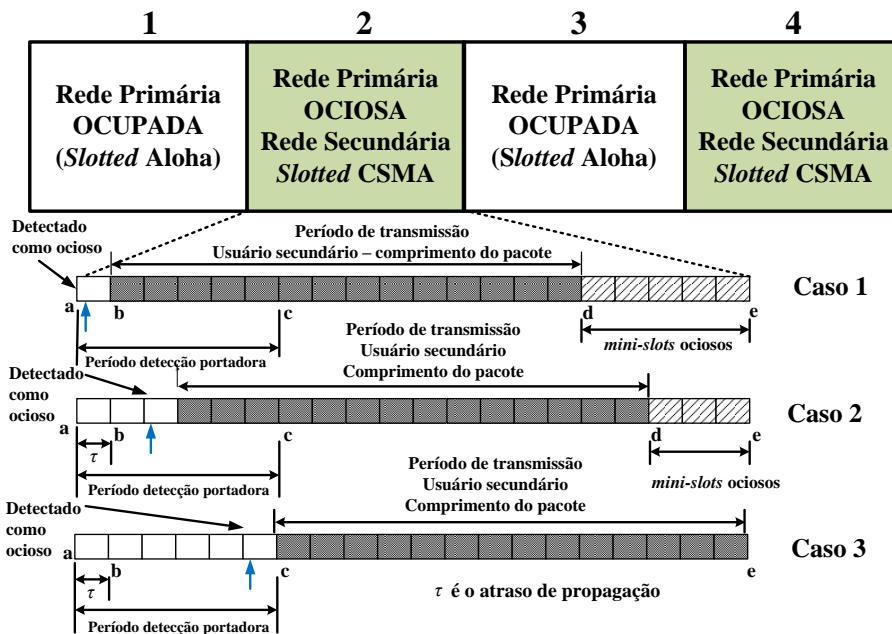


Figura 4.3 - Estrutura de *time slot* da rede primária e de *mini-slots* da rede secundária.

Cada *time slot* da rede primária é subdividido em *mini-slots*. A duração de cada *mini-slot* é feita igual ao maior atraso de propagação (τ) encontrado em quaisquer das duas redes estudadas e corresponde à distância temporal de *a* até *b* na Figura 4.3 [24]. Eles são denominados de *mini-slots*, pois tem uma duração muito menor do que a janela de tempo requerida para transmitir um pacote [24]. Assim sendo, a rede primária é baseada em estrutura de *time slots*, enquanto que a rede secundária é baseada na de *mini-slots* [14].

Existem dois tipos de conjuntos de *mini-slots*. O primeiro deles é o tipo S_{mi} que corresponde ao período de tempo que os USs usam para a detecção de portadora no canal. A segunda parte, que possui um número maior de *mini-slots* em comparação com aqueles despendidos para a detecção de portadora, é o tipo T_{mi} , que são usados pelos USs para transmissão de pacotes de dados realmente. Pela Figura 4.3, a máxima duração permitida para o período de detecção de portadora é dada pela distância de *a* até *c*. O instante *a* ocorre no início de um *time slot*. O ponto de detecção de portadora é ajustado para ocorrer no início de cada *mini-slot*. A distância entre o ponto *c* e o ponto *e* determina a duração máxima dos pacotes de dados da rede secundária em termos de números de *mini-slots* (T_{mi}). Portanto, a duração dos

pacotes da rede secundária é menor que aqueles da rede primária, devido ao período necessário para a detecção de portadora pelos USs [14].

4.4.2. Modelo de tráfego para a rede secundária

A Figura 4.4 ilustra o modelo de tráfego da rede. Nesta rede, cada usuário pode gerar um novo pacote com probabilidade σ_{mi} durante um *mini-slot*. Logo, a probabilidade de que um US não gere nenhum pacote novo em um *mini-slot* é $(1 - \sigma_{mi})$. Os usuários desta rede que estão em estado de *backlogged* ou em estado de retransmissão não podem gerar pacotes novos [14].

Quando ocorre um *time slot* na rede primária e um US gera um novo pacote durante um *mini-slot* pertencente ao período de detecção de portadora, esse usuário monitora o canal no começo do próximo ponto de detecção de portadora que ocorre no início do próximo *mini-slot* do período de detecção de portadora. Se o canal está ocioso nesse ponto, o pacote gerado é transmitido imediatamente. Caso contrário, se o canal está ocupado, esse US desiste de transmitir o pacote e passa a monitorar o canal com probabilidade σ_{mi} em cada um dos pontos de detecção seguintes do período de detecção de portadora corrente, ou seja, até o ponto c da Figura 4.3. Se o canal permanece ocupado durante todo o período de detecção de portadora corrente, o processo de monitoração do canal continua com probabilidade σ_{mi} em cada ponto de detecção de portadora de cada período de detecção durante cada um dos *time slots* seguintes, até que o canal se torne livre e o pacote seja transmitido com sucesso. Caso um novo pacote seja gerado fora do período designado à detecção de portadora ou quando o *time slot* está ocupado, ele é armazenado em um buffer e a estação começa a *escutar* o canal em cada ponto de detecção durante cada um dos períodos de detecção de portadora seguintes, até que o canal esteja livre e o pacote seja transmitido com sucesso. Considera-se ainda que a transmissão de uma estação da rede secundária pode começar a partir de qualquer ponto de detecção do período de detecção de portadora em que o canal se torna livre [14].

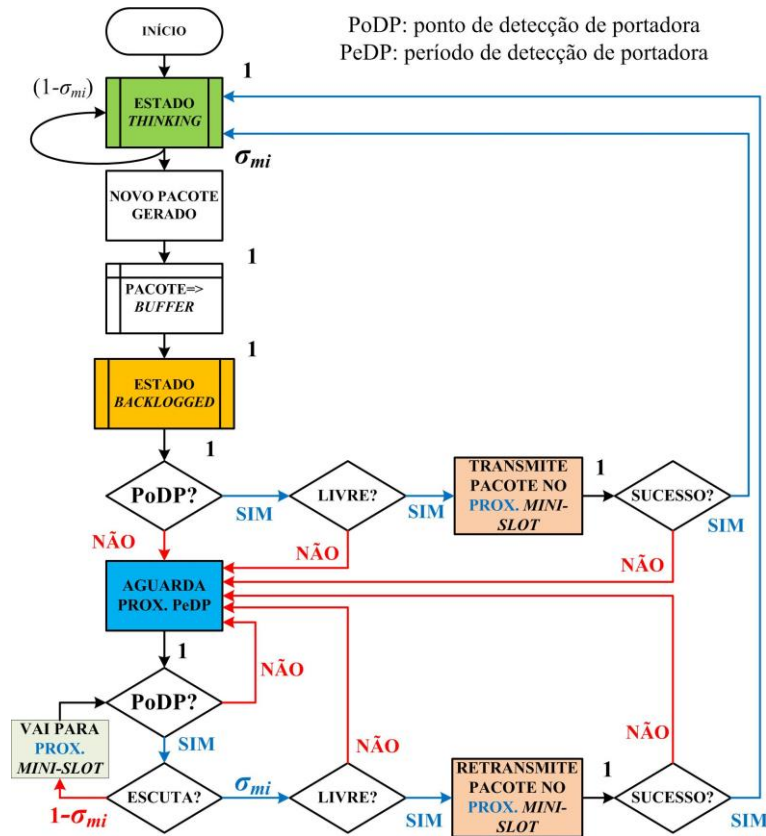


Figura 4.4 – Modelo de tráfego para a rede secundária com Slotted CSMA.

Observando os casos (1) e (2) da Figura 4.3, pode-se constatar que se o canal é caracterizado como livre antes do final do período de detecção de portadora do *time slot* corrente (ponto *c* na Figura 4.3), então após a transmissão efetiva do pacote de dados ocorrem alguns *mini-slots* que não são usados.

No modelo original, assume-se que os usuários secundários podem monitorar o meio e determinar se o canal está livre ou ocupado. Os *time slots* livres representam então oportunidades espectrais que são disputadas pelos usuários secundários em um ambiente de cooperação e competição entre eles.

4.4.3. Modelo de desvanecimento para a rede secundária

Considera-se um canal com desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh, conforme apresentado na Seção 3.2.3 e reproduzido novamente a seguir:

$$P_x(x_s) = \frac{1}{X_s} e^{-x_s/X_s}, \quad (4.19)$$

$$P_z(z_j) = \frac{1}{Z_s} e^{-z_j/Z_s}, \quad (4.20)$$

onde x_s é a potência instantânea do sinal do pacote de interesse, z_j é a potência instantânea do sinal dos pacotes interferentes, X_s e Z_s representam o valor médio da potência do sinal do pacote de interesse e dos pacotes interferentes, respectivamente. Em [14] é considerado que $X_s=Z_s$.

4.4.4. Efeito de captura da rede secundária

Assim como ocorre para o caso da rede primária, aqui é analisado o desempenho da rede secundária considerando-se também o efeito de captura.

A probabilidade de captura do pacote de interesse pelo PAS, $P_{scap \rightarrow PAS}$, pode ser calculada como [14]:

$$P_{scap \rightarrow PAS}(J_s) = \Pr \left(\frac{x_s}{\sum_{j=1}^{J_s-1} z_j} > R \right). \quad (4.21)$$

Onde x_s é o nível instantâneo da potência do sinal do pacote de interesse nesta rede, z_j é a potência instantânea dos sinais interferentes, J_s representa o número de usuários secundários que estão tentando transmitir simultaneamente e R é a razão de captura.

Considerando que os N_s usuários da rede secundária são independentes uns dos outros, então a função de distribuição conjunta para o sinal do pacote de interesse e os sinais dos pacotes interferentes pode ser expressa por [14]:

$$f(x_s, z_1, z_2, \dots, z_{J_s-1}) = \frac{1}{X_s} e^{-\frac{x_s}{X_s}} \prod_{j=1}^{J_s-1} \frac{1}{Z_s} e^{-\frac{z_j}{Z_s}}, \quad (4.22)$$

onde x_s e z_j são os valores instantâneos dos sinais dos pacotes de interesse e interferentes, respectivamente, X_s e Z_s representam os valores médio da potência do sinal de interesse e interferentes, respectivamente, e J_s é o número de USs que estão tentando transmitir um pacote durante uma oportunidade espectral.

A partir da Eq.(4.21) e da Eq.(4.22), pode-se calcular a probabilidade de captura de um pacote de interesse na rede secundária conforme abaixo [14]:

$$\begin{aligned} P_{scap \rightarrow PAS}(J_s) &= \Pr\left(\frac{x_s}{\sum_{j=1}^{J_s-1} z_j} > R\right) = \\ &= \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \int_{R(\sum_{j=1}^{J_s-1} z_j)}^\infty \frac{1}{X_s} e^{-\frac{x_s}{X_s}} dx_s \prod_{j=1}^{J_s-1} \frac{1}{Z_s} e^{-\frac{z_j}{Z_s}} dz_j = \\ &= \left(\frac{1}{R+1}\right)^{J_s-1}, \end{aligned} \quad (4.23)$$

onde x_s e z_j são os valores instantâneos dos sinais dos pacotes de interesse e interferente, respectivamente, X_s e Z_s representam os valores médios da potência do sinal de interesse e interferentes, respectivamente e J_s é o número de USs que estão tentando transmitir um pacote durante uma oportunidade espectral.

Observando a Eq.(4.23), cuja a dedução é mostrada no Anexo B, verifica-se que a probabilidade de captura depende da razão de captura e do número de usuários que estão tentando transmitir em um dado instante. Quanto maior a relação de captura definida para a rede, menor a probabilidade de captura de um pacote de interesse no ambiente com interferências. Quanto maior o número de usuários em tentativa de transmissão, menor é a probabilidade de captura, uma vez que a interferência na rede depende diretamente do número de usuários que estão tentando transmitir. Finalmente, quando $J_s=1$, o sinal do pacote de interesse sempre *captura* o PAS [14].

4.4.5. Cálculo da vazão da rede secundária para o modelo original

A vazão da rede secundária é a relação entre a duração do pacote de dados desta rede, em termos de *mini-slots*, e o número total de *mini-slots* usados no processo de transmissão de um pacote, incluindo os *time slots* ociosos e os ocupados [14].

Para o cálculo da vazão da rede secundária é necessário conhecer a probabilidade de que um pacote de interesse seja recebido com sucesso pelo PAS, supondo as situações em que há diferentes números de usuários disputando o *time slot*. Quando se considera o efeito de captura, a probabilidade de sucesso é igual a probabilidade de que o pacote gerado por um US *capture* o PAS, dado que existe um certo número de usuários em tentativa de transmissão ou retransmissão. A vazão é então obtida calculando o valor da probabilidade de sucesso na rede e considerando as outras probabilidades e métricas que afetam a vazão da rede secundária. As probabilidades que precisam ser determinadas são: (1) a probabilidade de ocorrência de *time slot* ocioso na rede primária; e (2) a probabilidade de se detectar um *mini-slot* livre dentro do período de detecção de portadora da rede secundária, quando o envio do pacote de interesse não é iniciado no primeiro *mini-slot* de um *time slot* ocioso. Por outro lado, como alguns *mini-slots* da rede secundária são gastos no período de detecção de portadora, a duração do pacote desta rede é menor que a duração do *time slot* e esta métrica também afeta a vazão da rede secundária.

Para calcular a vazão, são considerados dois possíveis eventos.

- Evento E_s : o PAS recebe com sucesso um pacote gerado por um US, durante um *time slot* ocioso, isto é, sem transmissões de UPs.
- Evento T_{js} : em um dado *time slot* ocioso há J_s usuários tentando transmitir um pacote de dados para o PAS.

Considerando que as probabilidades de captura, $P_{scap \rightarrow PAS}(J_s)$, para cada um dos J_s usuários desta rede, que estão em tentativa de transmissão durante um *time slot*

livre, são iguais e levando em consideração que os usuários secundários podem *escutar* o canal e somente tentam transmitir quando um *time slot* da rede primária está ocioso, então:

$$P_{scap \rightarrow PAS}(1) = P_{scap \rightarrow PAS}(2) = \dots = P_{scap \rightarrow PAS}(J_s). \quad (4.24)$$

Suponha que durante a ocorrência de um *time slot* ocioso apenas uma estação tenta transmitir seu pacote após detectar um *mini-slot* ocioso, ou seja, $J_s=1$. A probabilidade de que um pacote seja capturado dado que há J_s usuários disputando um *time slot* ocioso, $Pr(E_s/T_{js})$, é igual à probabilidade de captura do pacote, $P_{scap \rightarrow PAS}(1)$, que nesse caso, como não há estações interferentes, é igual à unidade, conforme pode ser observado na Eq.(4.23) e mostrado abaixo:

$$Pr(E_s | T_{js}) = P_{scap \rightarrow PAS}(1) = \left(\frac{1}{R+1} \right)^{1-1} = 1. \quad (4.25)$$

Em [14] é considerado que os USs podem escutar o meio e somente transmitem quando não há nenhum usuário da rede primária em processo de transmissão de pacotes. Seja agora o mesmo contexto acima, porém com dois usuários secundários tentando transmitir seus pacotes. A probabilidade de sucesso é igual à soma das probabilidades de captura de cada uma das estações, ou seja:

$$Pr(E_s | T_{js}) = P_{scap \rightarrow PAS}(1) + P_{scap \rightarrow PAS}(2) = 2 \cdot P_{scap \rightarrow PAS}(J_s). \quad (4.26)$$

Continuando o raciocínio anterior, a probabilidade condicional de que um pacote seja capturado pelo PAS, dado que J_s usuários estão tentando transmitir num dado *time slot* ocioso, pode ser calculada como a seguir [14]:

$$Pr(E_s | T_{js}) = P_{scap \rightarrow PAS}(1) + P_{scap \rightarrow PAS}(2) + \dots + P_{scap \rightarrow PAS}(J_s). \quad (4.27)$$

E finalmente, como apresentado em [14]:

$$\Pr(E_s | T_{j_s}) = J_s \cdot P_{scap \rightarrow PAS}(J_s). \quad (4.28)$$

De acordo com [57], a probabilidade de que mais de um US transmita ao mesmo tempo, $P(J_s tx)$ pode ser calculada por:

$$P(J_s tx) = \binom{N_s}{J_s} \sigma_{mi}^{J_s} (1 - \sigma_{mi})^{N_s - J_s}, \quad (4.29)$$

onde N_s é o número total de USs da rede secundária, σ_{mi} é a probabilidade de uma estação no estado *thinking* gerar um novo pacote ou de um usuário no estado *backlogged* detectar se o meio está livre ou não e J_s é o número de USs que estão disputando um *time slot* ocioso.

Considerando a Eq.(4.28) e a Eq.(4.29) e sabendo que a probabilidade de sucesso, P_s , é a soma das probabilidades de captura do pacote de interesse pelo PAS dado que há J_s usuários tentando transmitir simultaneamente seus pacotes para as várias combinações de estações transmissoras possíveis, tem-se [57]:

$$\begin{aligned} P_s &= \sum_{j_s=0}^{N_s} \binom{N_s}{j_s} \sigma_{mi}^{j_s} (1 - \sigma_{mi})^{N_s - j_s} \Pr(E_s | T_{j_s}) = \\ &= \sum_{j_s=0}^{N_s} j_s \binom{N_s}{j_s} \sigma_{mi}^{j_s} (1 - \sigma_{mi})^{N_s - j_s} \left(\frac{1}{R+1} \right)^{j_s - 1}. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Onde j_s é número de estações tentando transmitir simultaneamente, N_s é o número total de USs da rede secundária, σ_{mi} é a probabilidade de uma estação no estado *thinking* gerar um novo pacote ou de um usuário no estado *backlogged* detectar se o meio está livre ou não e R é a razão de captura.

Se um US com pacote a ser enviado para o PAS escuta o meio, por exemplo, no segundo *mini-slot* do período de detecção de portadora, então ele somente pode iniciar a transmissão se o *mini-slot* anterior ficou ocioso. A probabilidade de que o primeiro *mini-slot* do período de detecção de portadora, $P_{mi_idle}(1)$, não esteja em uso por nenhum US é dada por:

$$P_{mi_idle}(1) = (1 - \sigma_{mi})^{N_s}. \quad (4.31)$$

A probabilidade de ocorrência de $(S_{mi}-1)$ *mini-slots* em um *time slot* livre, sem que nenhum US tente transmitir é igual:

$$P_{mi_idle}(S_{mi} - 1) = ((1 - \sigma_{mi})^{N_s})^{S_{mi}-1}. \quad (4.32)$$

Seja a Figura 4.5 mostrada a seguir, que leva em conta a ocorrência de um *time slot* ocioso [14]. No primeiro caso, J_s estações detectam o meio livre no primeiro *mini-slot* do período de detecção de portadora e iniciam a transmissão de pacotes no *mini-slot* seguinte. A probabilidade de sucesso nesse caso é dada pela Eq.(4.30). No segundo caso, no primeiro *mini-slot* nenhuma estação tenta transmitir, porém, no segundo *mini-slot*, J_s usuários tentam. Nesse caso, a probabilidade de que o pacote de interesse seja capturado, $P_{cap}(L=l)$, $l=1,2,\dots$, é dada pela equação abaixo:

$$P_{cap}(L = 2) = (1 - \sigma_{mi})^{N_s} \cdot P_s. \quad (4.33)$$

Onde L indica em qual *mini-slot* houve escuta do canal de transmissão, σ_{mi} é a probabilidade de uma estação no estado *thinking* gerar um novo pacote ou de um usuário no estado *backlogged* detectar se o meio está livre ou não, N_s é o número total de USs da rede secundária e P_s é a probabilidade de sucesso dada pela Eq.(4.30).

Continuando o raciocínio para todos os possíveis *mini-slots* do período de detecção de portadora, até o *mini-slot* denominado S_{mi} do caso 3, tem-se:

$$P_{cap}(L = S_{mi}) = [(1 - \sigma_{mi})^{N_s}]^{S_{mi}-1} \cdot P_s. \quad (4.34)$$

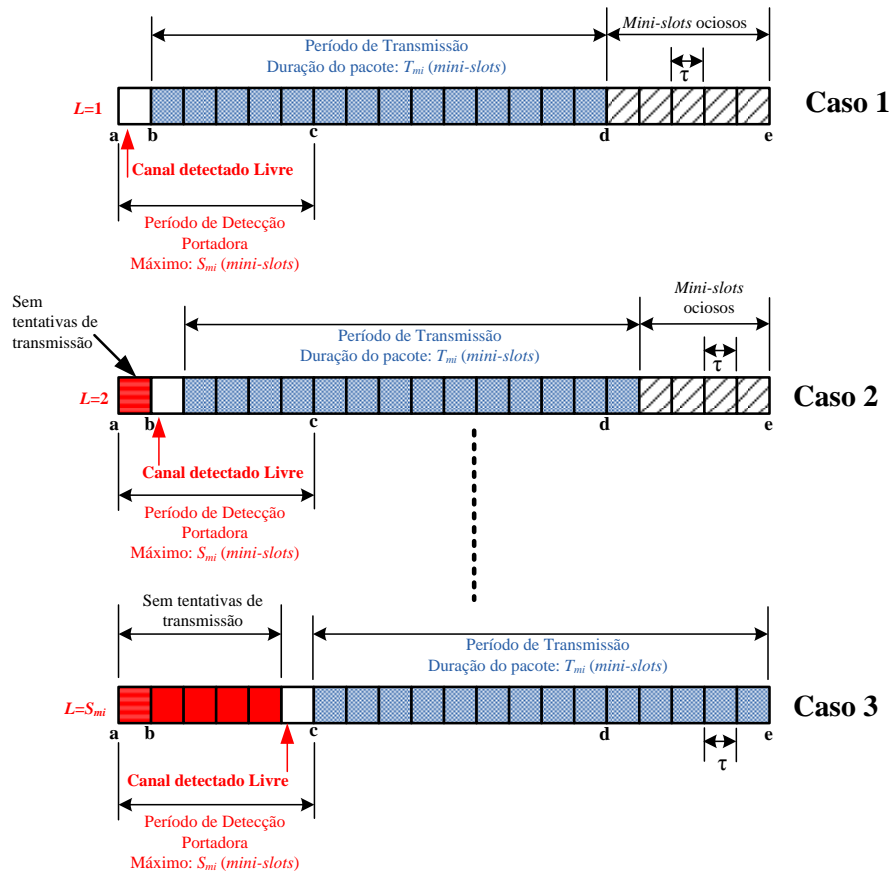


Figura 4.5 – Estudo de casos de uso e detecção de mini-slots livres na rede secundária.

Assim sendo, a probabilidade de sucesso, P_{suc} , na transmissão de um pacote de interesse na rede secundária é a soma das probabilidades de captura, P_{cap} ($L=l$), $l=1,2,\dots, S_{mi}$, conforme abaixo:

$$P_{suc} = \sum_{s=1}^{S_{mi}} \left((1 - \sigma_{mi})^{N_s} \right)^{s-1} \cdot P_s. \quad (4.35)$$

A probabilidade de ocorrência de um *time slot* ocioso na rede primária, P_{idle} , é calculada por [14]:

$$P_{idle} = (1 - \sigma_p)^{N_p}, \quad (4.36)$$

onde σ_p representa a probabilidade de geração de um novo pacote por um UP ou a probabilidade de retransmissão de pacotes nos *time slots* seguintes e N_p é o número total de UPs alocados na rede primária.

Na rede secundária, a estrutura de *time slot* é dividida em dois conjuntos de *mini-slots*. O primeiro subconjunto é formado por uma quantidade menor de *mini-slots* destinados ao período de detecção de portadora. O segundo é formado por uma quantidade bem maior de *mini-slots* que são usados realmente para transporte de informação. Observando a Figura 4.5, constata-se que a duração do *time slot* ocioso, L_{mi} , é igual a:

$$L_{mi} = S_{mi} + T_{mi}, \quad (4.37)$$

onde S_{mi} é a duração máxima do período de detecção de portadora e T_{mi} é a duração do pacote de dados na rede secundária.

De acordo com [14], quando um US detecta o canal livre, ele inicia a transmissão do pacote gerado no *mini-slot* seguinte. Se o ponto de detecção de canal livre ocorre antes do último *mini-slot* do período de detecção de portadora, após a transmissão do pacote sobram alguns *mini-slots* ociosos. Assim sendo, uma quantidade constante e igual a S_{mi} [*mini-slots*] sempre não é usada para transportar informação efetivamente. Então a taxa de utilização do *time slot* ocioso da rede primária pelos USs, U_{mi} , é calculada por:

$$U_{mi} = \frac{T_{mi}}{L_{mi}} = \frac{T_{mi}}{T_{mi} + S_{mi}}. \quad (4.38)$$

Finalmente, a vazão da rede secundária, S_{os} , é dada por [14]:

$$S_{os} = P_{idle} \cdot U_{mi} \cdot \sum_{s=1}^{S_{mi}} \left((1 - \sigma_{mi})^{N_s} \right)^{s-1} \sum_{j_s=0}^{N_s} \binom{N_s}{j_s} \sigma_{mi}^{j_s} (1 - \sigma_{mi})^{N_s - j_s} \Pr(E_s | T_{j_s}), \quad (4.39)$$

onde S_{os} é a vazão da rede secundária, P_{idle} é a probabilidade de ocorrência de um *time slot* ocioso na rede primária, U_{mi} é a chamada taxa de utilização de um *time slot* ocioso por um US, σ_{mi} é a probabilidade de um US gerar um novo pacote em um dado *mini-slot* ou a probabilidade de *escutar* um dado *mini-slot* dentro do período de detecção de portadora, S_{mi} é o número máximo de *mini-slots* reservados para detecção de portadora, N_s é o número total de usuários da rede secundária, j_s é o número de USs que estão tentando transmitir em um dado *time slot* ocioso, $\Pr(E_s|T_{j_s})$ é a probabilidade condicional de que o pacote de interesse da rede secundária seja capturado pelo PAS dado que há J_s tentando transmitir dados, E_s é o evento definido em [14] como aquele em que o pacote de interesse é capturado pelo PAS e T_{j_s} é o evento também definido em [14] de que há j_s USs disputando um *time slot* ocioso da rede primária.

Substituindo a Eq.(4.23), a Eq.(4.28), a Eq.(4.36) e a Eq.(4.38) na Eq.(4.39), obtém-se [14]:

$$S_{os} = \frac{(1 - \sigma_p)^{N_p} T_{mi}}{(T_{mi} + S_{mi})} \sum_{s=1}^{S_{mi}} \left((1 - \sigma_{mi})^{N_s} \right)^{s-1} \times \sum_{j_s=0}^{N_s} j_s \binom{N_s}{j_s} \sigma_{mi}^{j_s} (1 - \sigma_{mi})^{N_s - j_s} \left(\frac{1}{R + 1} \right)^{j_s - 1}. \quad (4.40)$$

Onde σ_p é a probabilidade de geração de um novo pacote ou de sua retransmissão na rede primária, N_p é o número total de usuários da rede primária, T_{mi} é o tempo reservado para transmissão de um pacote de dados da rede secundária, S_{mi} é o número máximo de *mini-slots* dedicados para detecção de portadora e R é a razão de captura definida.

4.4.6. Cálculo do atraso médio da rede secundária no modelo original

O atraso da rede secundária é definido como o número médio de *mini-slots* que um pacote leva para ser transmitido com sucesso.

Em [14], o atraso médio da rede secundária desta arquitetura não é estudado ou analisado. Esse estudo é proposto em [14] como trabalho futuro. Na Seção 4.12 deste capítulo, como contribuição desta dissertação, propõe-se um método para calcular o atraso médio na rede secundária. Para validá-lo, foi desenvolvida uma simulação de Monte Carlo usando o MATLAB, que é apresentada no Apêndice I.

4.5. Análise da vazão global das redes no modelo original

Em [14], a vazão global das redes, S_{ot} , é dada pela soma das vazões individuais, isto é,

$$S_{ot} = S_{op} + S_{os}. \quad (4.41)$$

Onde S_{op} é a vazão da rede primária e S_{os} é a vazão da rede secundária; ambas considerando o modelo original.

Substituindo a Eq.(4.12) e a Eq.(4.40) na Eq.(4.41), obtém-se a vazão global da rede, conforme a equação abaixo [14]:

$$\begin{aligned} S_{ot} = & \sum_{i=0}^{N_p} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1 - \sigma_p)^{N_p - i} \cdot i \left(\frac{1}{R + 1} \right)^{i-1} + \\ & + \frac{(1 - \sigma_p)^{N_p} T_{mi}}{(T_{mi} + S_{mi})} \sum_{s=1}^{S_{mi}} \left((1 - \sigma_{mi})^{N_s} \right)^{s-1} \times \\ & \times \sum_{j_s=0}^{N_s} j_s \binom{N_s}{j_s} \sigma_{mi}^{j_s} (1 - \sigma_{mi})^{N_s - j_s} \left(\frac{1}{R + 1} \right)^{j_s - 1}, \end{aligned} \quad (4.42)$$

onde N_p é o número de usuários primários, i é o número de UPs que estão tentando transmitir pacotes num dado *time slot*, σ_p é a probabilidade de retransmissão ou geração de um novo pacote por um UP, R é a razão de captura, T_{mi} é o tempo reservado para transmissão de um pacote de dados da rede secundária, S_{mi} é o número máximo de *mini-slots* dedicados para detecção de portadora, σ_{mi} é a probabilidade de um US gerar um novo pacote em um dado *mini-slot* ou a probabilidade de *escutar* um dado *mini-slot* dentro do período de detecção de

portadora, N_s é o número total de usuários da rede secundária e j_s é o número de USs que estão tentando transmitir em um dado *time slot* ocioso.

4.6. Novo modelo de sistema

No modelo original, nos cálculos da vazão das redes, do atraso médio da rede primária e da vazão global, não é considerada a PER devido aos sinais interferentes presentes nas redes. Nesta seção, apresenta-se um novo modelo que considera o efeito da PER sobre o desempenho das redes.

A arquitetura do sistema da Figura 4.1 e o modelo de tráfego empregado no estudo do modelo original são mantidos para o novo modelo, a fim de que se possa fazer a comparação de seus desempenhos e verificar o impacto da PER sobre a vazão e o atraso médio.

A rede primária possui N_p usuários primários, dos quais I_p , ($0 \leq I_p \leq N_p$), estão tentando transmitir seus pacotes durante um *time slot* e o protocolo MAC usado é *Slotted Aloha*. A rede secundária possui N_s usuários secundários que podem monitorar o meio e detectar se o canal está sendo usado ou não por algum UP. Quando ocorre algum *time slot* ocioso, J_s usuários secundários podem disputá-lo com o objetivo de transmitir o seus pacotes de dados, sendo que ($0 \leq J_s \leq N_s$). Na rede secundária é usado o protocolo *Slotted CSMA* e a estrutura de *mini-slots* é apresentada na Figura 4.3 [14].

4.6.1. Cálculo da relação sinal-interferência

Na modelo de tráfego considerado, os USs podem *escutar* o canal e determinar se um *time slot* da rede primária está ocioso ou não. Desta forma, quando há atividades na rede primária, os sinais interferentes são causados única e exclusivamente pelas transmissões simultâneas dos UPs que estão tentando acessar um *time slot* num dado instante. Por outro lado, quando um *time slot* é detectado ocioso, não há nenhum UP tentando transmitir dados e os USs que possuem pacotes

a serem transmitidos podem disputar o acesso ao canal e as interferências presentes na rede nesse momento se devem às atividades desses USs apenas [14].

Diante do exposto anteriormente, a potência média interferente total, P_{ip} , presente na rede primária quando há UPs tentando transmitir seus pacotes é igual à soma das potências médias dos sinais interferentes de cada UP não ocioso, Y_i , excetuando-se a potência média do sinal do pacote de interesse, X_p e pode ser calculada como dado abaixo:

$$P_{ip} = \sum_{i=1}^{I_p-1} Y_i. \quad (4.43)$$

Onde I_p é o número de UPs que estão tentando transmitir pacotes num dado *time slot*.

De [14], tem-se que:

$$Y_1 = Y_2 = \dots Y_{I_p-1} = Y_i. \quad (4.44)$$

Onde $Y_1, Y_2, \dots, Y_{I_p-1}$ são os valores médios da potência interferente de cada rádio em atividade da rede primária, sem considerar aquele que transmite o pacote de interesse.

Portanto, a potência média interferente total da rede primária é dada por:

$$P_{ip} = (I_p - 1)Y_i. \quad (4.45)$$

De forma análoga, a potência média interferente total da rede secundária, P_{is} , é calculada como:

$$P_{is} = (J_s - 1)Z_j. \quad (4.46)$$

Onde J_s representa o número de usuários secundários que estão tentando transmitir quando ocorre um *time slot* ocioso e Z_j é a potência média interferente da rede secundária.

Na rede primária, o valor médio da SIR, Δ_p , pode ser calculada através da relação entre a potência média do sinal do pacote de interesse, X_p , e a potência média interferente total, P_{ip} , conforme mostrado a seguir:

$$\Delta_p = \frac{X_p}{P_{ip}} = \frac{X_p}{(I_p - 1)Y_i}. \quad (4.47)$$

Em [14] tem-se que $X_p=Y_i$, logo o valor médio da SIR na rede primária é dado por:

$$\Delta_p = \frac{1}{(I_p - 1)}. \quad (4.48)$$

Onde I_p é o número de UPs que estão tentando transmitir pacotes de dados em um dado *time slot*.

Na rede secundária, o valor esperado da SIR, Δ_s , é dada pela divisão entre o valor médio da potência do sinal do pacote de interesse, X_s , e o valor da potência média interferente total na rede secundária, P_{is} , conforme mostrado na equação a seguir:

$$\Delta_s = \frac{X_s}{P_{is}} = \frac{X_s}{(J_s - 1)Z_j}. \quad (4.49)$$

Sabendo de [14] que $X_s=Z_j$, então a SIR média da rede secundária é igual a:

$$\Delta_s = \frac{1}{(J_s - 1)}. \quad (4.50)$$

Onde J_s é o número de usuários secundários que tentam transmitir pacotes num dado *time slot* ocioso da rede primária.

4.6.2. Taxa média de erros de pacotes

Nas análises realizadas neste trabalho, considera-se modulação BPSK coerente sem codificação de canal e que os pacotes da rede primária e secundária têm comprimento de 127 [bits]. Diante do exposto, a PER e a PSR podem ser obtidas de forma aproximada conforme a Eq.(3.49) e a Eq.(3.50), reproduzidas a seguir:

$$P_{ave}(\Delta) \cong 1 - e^{-w_0/\Delta}, \quad (4.51)$$

$$PSR(\Delta) \cong e^{-w_0/\Delta}. \quad (4.52)$$

4.7. Análise do desempenho da rede primária para o novo modelo

A seguir são calculadas a vazão e o atraso médio para a rede primária que tem prioridade de transmissão e usa o protocolo *Slotted Aloha*. No novo modelo, além do efeito de captura e do desvanecimento por Rayleigh, o desempenho da rede primária é calculado considerando-se a PER, diferentemente do que ocorre em [14].

4.7.1. Cálculo da vazão da rede primária para o novo modelo

A vazão na rede primária é definida como sendo o número total de pacotes transmitidos pelos usuários primários e recebidos corretamente pelo PAP durante um *time slot*. No novo modelo proposto, o pacote é transmitido corretamente quando ele é capturado pelo PAP e não tem erros devido à interferência presente na rede primária.

A vazão da rede primária para o novo modelo, S_{np} , é calculada por:

$$S_{np} = S_{op} \times PSR(\Delta_p). \quad (4.53)$$

Onde S_{op} é a vazão da rede primária conforme o modelo original e $PSR(\Delta_p)$ é a taxa média de pacotes transmitidos sem erros devido às interferências da rede, dada na Eq.(4.52), e Δ_p é o valor médio da SIR da rede primária, obtida conforme a Eq.(4.48).

Substituindo a Eq.(4.12), Eq.(4.48) e a Eq.(4.52) na Eq.(4.53), obtém-se a vazão da rede primária de forma aproximada, conforme dados a seguir:

$$S_{np} \cong S_{op} \times e^{-w_0(I_p-1)}$$

$$S_{np} \cong \sum_{i=0}^{N_p} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-i} \cdot i \cdot \left(\frac{1}{R+1}\right)^{i-1} \cdot e^{-w_0(i-1)}, \quad (4.54)$$

onde N_p é o número total de usuários da rede primária, i é o número de usuários em tentativa de transmissão durante um *time slot*, σ_p é a probabilidade de que um UP gere um novo pacote ou tente uma retransmissão, R é a razão de captura e w_0 é uma constante usada nesse método de cálculo da PER em canais com desvanecimento por Rayleigh.

4.7.2. Cálculo do atraso médio da rede primária para o novo modelo

Para o novo modelo, o atraso médio é definido como o número médio de *time slots* que um usuário da rede primária gasta para transmitir com sucesso seus respectivos pacotes, considerando desvanecimento por Rayleigh, o efeito de captura e a PER, devido às interferências das estações desta rede.

Seja p_{np} a probabilidade de que um UP consiga transmitir com sucesso um pacote de interesse no primeiro *time slot* após sua geração, considerando a PER. Esta probabilidade pode ser calculada conforme a equação dada a seguir:

$$p_{np} = p_{op} \cdot PSR(\Delta_p), \quad (4.55)$$

onde p_{op} é a probabilidade de que um pacote consiga ser transmitido com sucesso no primeiro *time slot* após sua geração, considerando o efeito de captura e o desvanecimento por Rayleigh, e $PSR(\Delta)$ é taxa média de pacotes transmitidos com sucesso na rede primária.

Substituindo a Eq.(4.52) na Eq.(4.55), tem-se:

$$p_{np} \cong p_{op} \cdot e^{-w_0(i_i)}. \quad (4.56)$$

Onde i_i é o número de estações interferentes da rede primária. Nesse caso, a SIR média da rede primária é calculada como: $\Delta_p=1/I_p$.

Seja agora $P_{np}(K=k)$ a probabilidade de que um pacote de interesse gerado na rede primária seja recebido com sucesso no k -ésimo *time slot* após sua transmissão ($k=1$) ou retransmissão ($k>1$) [14].

O atraso médio da rede primária para o modelo novo, D_{np} , que considera a PER, é o valor esperado da variável aleatória discreta K e é calculado através das equações apresentadas a seguir:

$$D_{np} = E[K], \quad (4.57)$$

$$D_{np} = 1 + \frac{1 - p_{np}}{p_{np} \sigma_p}, \quad (4.58)$$

onde σ_p é a probabilidade de que um UP gere um novo pacote ou tente a retransmissão de um pacote.

Substituindo a Eq.(4.56) na Eq.(4.58), tem-se:

$$D_{np} \cong 1 + \frac{1 - p_{op} \cdot e^{-w_0(i_i)}}{p_{op} \cdot e^{-w_0(i_i)} \cdot \sigma_p}. \quad (4.59)$$

Onde w_0 é um valor constante definido para o limitante superior para um canal com desvanecimento por Rayleigh, i_i é o número de estações interferentes durante um *time slot* e P_{op} é a probabilidade de que um pacote gerado por algum UP possa ser capturado pelo PAP na primeira tentativa de transmissão após sua geração. A probabilidade P_{op} é calculada conforme a Eq.(4.13).

4.8. Análise do desempenho da rede secundária para o novo modelo

Nesta seção é calculada a vazão da rede secundária, conforme novo modelo que considera o efeito de captura, o desvanecimento no canal segundo a distribuição de Rayleigh e, estendendo o trabalho apresentado em [14], levando em conta também a PER devido às interferências causadas na rede pelas estações em tentativa de transmissão de pacotes durante um *time slot* ocioso.

4.8.1. Cálculo da vazão da rede secundária para o novo modelo

Para o novo modelo, a vazão da rede secundária é definida como sendo a duração do pacote em termos de *mini-slots* dividido pelo número total de *mini-slots* usados no seu processo de transmissão, considerando tanto as janelas ocupadas e ociosas [14], e, também agora, os efeitos da PER devido às interferências da rede. A vazão, S_{ns} , pode ser calculada pela equação dada a seguir:

$$S_{ns} = S_{os} \cdot PSR(\Delta_s), \quad (4.60)$$

onde S_{os} é a vazão da rede primária conforme o modelo original, $PSR(\Delta_s)$ é a taxa média de transmissão de pacotes sem erros devido à interferência, dada na Eq.(4.52) e Δ_s é o valor médio da SIR na rede primária, calculada conforme a Eq.(4.50).

Substituindo a Eq.(4.50) e a Eq.(4.52) na Eq.(4.60), obtém-se:

$$S_{ns} = S_{os} \cdot e^{-w_0(J_s - 1)}, \quad (4.61)$$

onde w_0 é um valor constante definido para o limitante superior para um canal com desvanecimento por Rayleigh, J_s é o número de usuários que tentam transmitir simultaneamente durante um *time slot* ocioso na rede primária. A vazão da rede secundária para o modelo original, S_{os} , é obtida através da Eq.(4.40) e a fórmula final para esta vazão no novo modelo é:

$$S_{ns} = \frac{(1 - \sigma_p)^{N_p} T_{mi}}{(T_{mi} + S_{mi})} \sum_{s=1}^{S_{mi}} \left((1 - \sigma_{mi})^{N_s} \right)^{s-1} \times \quad (4.62)$$

$$\times \sum_{j_s=0}^{N_s} j_s \binom{N_s}{j_s} \sigma_{mi}^{j_s} (1 - \sigma_{mi})^{N_s - j_s} \left(\frac{1}{R+1} \right)^{j_s - 1} \cdot e^{-w_0 (J_s - 1)},$$

onde, σ_p é a probabilidade de geração de um novo pacote ou de sua retransmissão na rede primária, N_p é o número total de usuários da rede primária, T_{mi} é a duração de um pacote de dados da rede secundária, S_{mi} é o número máximo de *mini-slots* dedicados para detecção de portadora e R é a razão de captura.

4.9. Cálculo da vazão global para o novo modelo

A vazão global do sistema para o novo modelo, S_{nt} , que considera a PER devido às interferências das redes, é a soma das vazões obtidas para cada rede em separado, ou seja,

$$S_{nt} = S_{np} + S_{ns}. \quad (4.63)$$

Onde S_{np} é a vazão da rede primária e S_{ns} é a vazão da rede secundária, ambas considerando o novo modelo apresentado. Estas vazões podem ser obtidas por meio da Eq.(4.54) e da Eq.(4.62), respectivamente.

4.10. Resultado numérico para a análise de vazão das redes

A Figura 4.6, a Figura 4.7 e a Figura 4.8 trazem os gráficos com os resultados analíticos obtidos para a vazão da rede primária e secundária e a vazão global, respectivamente, tanto para o modelo original quanto para o novo modelo proposto.

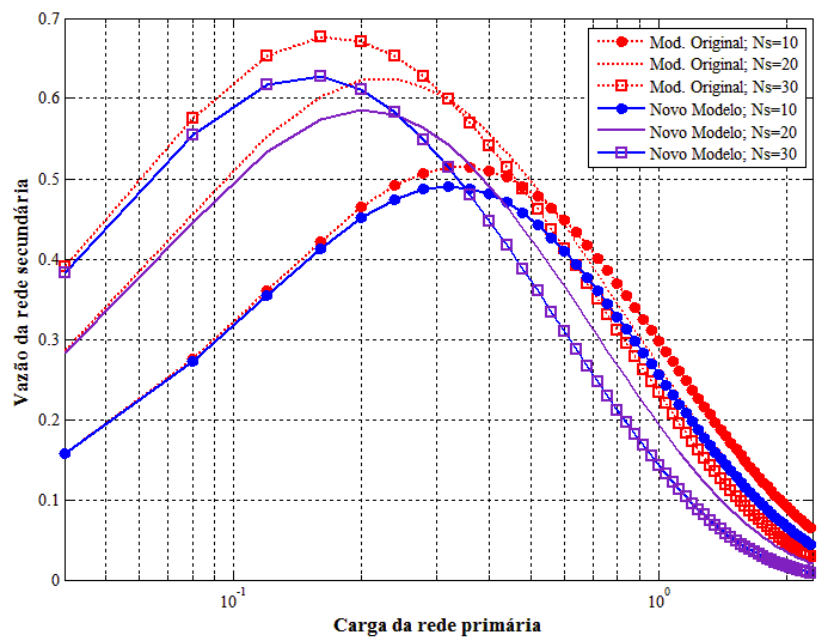


Figura 4.6 – Vazão da rede secundária ($N_p=20$, $N_s=10, 20, 30$, $S_{mi}=10$, $T_{mi}=100$, $R=3$ dB).

Para efeito de comparação entre as vazões do novo modelo e do modelo original, são usados os mesmos parâmetros empregados na análise feita em [14], isto é, $N_p = 20$, $N_s = 10, 20, 30$, $R = 3$ (dB), $S_{mi} = 10$ (mini-slots), $T_{mi} = 100$ (mini-slots) e $\sigma_p = \sigma_{mi}$.

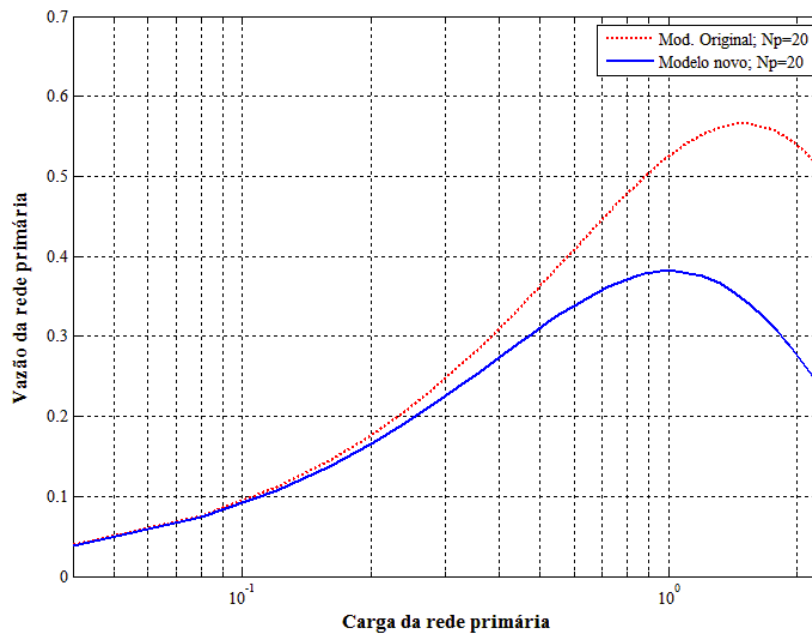


Figura 4.7 – Vazão da rede primária ($N_p=20$, $R=3$ dB).

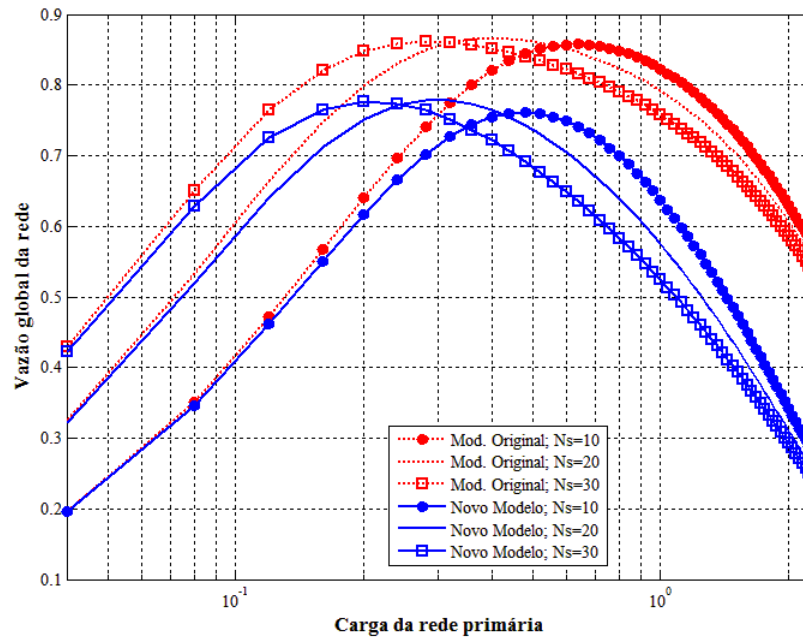


Figura 4.8 – Vazão global das redes ($N_p=20$, $N_s=10, 20, 30$, $S_{mi}=10$, $T_{mi}=100$, $R=3$ dB).

No modelo original, o pacote é considerado recebido com sucesso se ele *captura* o ponto de acesso da rede. No novo modelo, a recepção com sucesso ocorre se ele *captura* o ponto de acesso e não contém erros devido à interferência nas respectivas redes. Por esses gráficos, pode-se observar que a PER tem forte impacto sobre o valor da vazão de cada rede e sobre a vazão global do sistema, reduzindo seus valores de forma significativa e, portanto, ela não deveria ser desconsiderada, conforme ocorre nas análises apresentadas em [14].

4.11. Resultado numérico para o atraso médio da rede primária

A Figura 4.9 mostra os gráficos do atraso médio para a rede primária considerando o modelo original e o novo modelo.

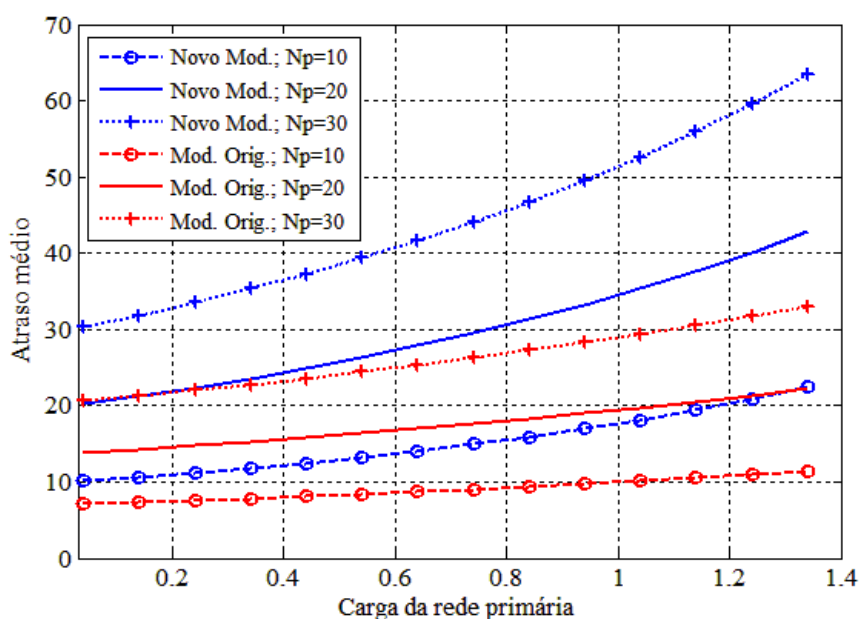


Figura 4.9 – Atraso médio da rede primária ($N_p=10, 20, 30, R=3 \text{ dB}, \sigma_p=G/N_p$).

Os gráficos da Figura 4.9 mostram que o atraso médio da rede aumenta quando é considerada a PER, devido à interferência causada pelos usuários da rede primária. Sendo assim, diferentemente do que ocorre no modelo original, a PER deve ser considerada nos cálculos do atraso médio da rede primária, conforme evidencia as curvas do novo modelo da Figura 4.9.

4.12. Método para cálculo do atraso médio da rede secundária

Nesta seção é apresentado um método para cálculo do atraso médio da rede secundária. Em [14] tal atraso médio não é calculado, sendo proposto como trabalho futuro.

Para calcular o atraso médio da rede secundária, considera-se a arquitetura de redes apresentada na Figura 4.1 da Seção 4.2. Novamente considera-se um canal com desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh e o efeito de captura.

O cálculo do atraso médio é realizado para dois modelos: (1) modelo que considera a PER e (2) modelo que não considera a taxa média de erros de pacotes.

Neste método é proposta uma nova estrutura de *mini-slots* e um modelo de tráfego diferente daqueles apresentados nas Seções 4.4.1 e 4.4.2 deste capítulo.

4.12.1. Estrutura de *mini-slots* para cálculo do atraso médio da rede secundária

A Figura 4.10 mostra a estrutura de *mini-slots* usada na rede secundária. Esta rede possui um ponto de acesso (PAS) e N_s usuários que usam o protocolo *Slotted CSMA* para acesso ao meio de maneira oportunista. A rede primária também possui um ponto de acesso (PAP) e seus N_p usuários estão na área de alcance de recepção e transmissão do PAS e vice-versa [14]. Cada *time slot* da rede primária pode estar livre ou ocupado, dependendo do estado de transmissão de cada usuário primário no início de cada *time slot*. As oportunidades para os USs ocorrem quando um *time slot* está livre, isto é, não existe nenhum UP tentando transmitir no começo dele.

Na rede secundária, o *time slot* (T) é dividido em dois grupos de *mini-slots*: período de detecção de portadora (S_{mi}) e duração do pacote (T_{mi}). Cada *mini-slot* é ajustado para ter uma duração igual ao máximo atraso de propagação experimentado em quaisquer das redes, conforme mostrado na Figura 4.10 entre os pontos a e b [14]. O intervalo de tempo entre a e c é o período de tempo máximo reservado para a detecção de portadora nas redes e a distância temporal entre c e e é o intervalo mínimo necessário para transmitir um pacote de dados da rede secundária. Como pode ser visto na Figura 4.10, os pacotes da rede secundária têm duração menor que os pacotes da rede primária. Os pontos de detecção de portadora ocorrem no início de cada *mini-slot* do período de detecção de portadora e, no modelo proposto nesta seção, há $(S_{mi}+1)$ pontos de detecção e transmissão possíveis. Quando um US detecta uma oportunidade em um dado ponto de detecção de portadora, ele inicia a transmissão imediatamente, dentro do próprio *mini-slot* detectado como livre. Desta forma, no final de um dado *time slot* livre, pode haver alguns *mini-slots* não usados.

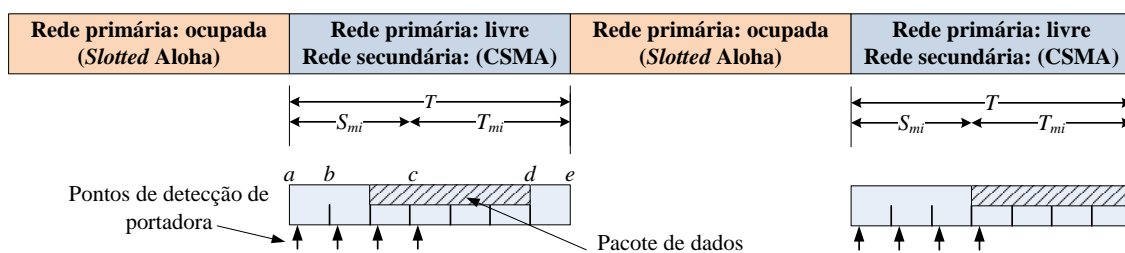


Figura 4.10 – Nova estrutura de mini-slots da rede secundária.

Neste modelo, considera-se que a detecção é perfeita, isto é, a probabilidade de falsa detecção de portadora é nula. Além disso, todos os usuários da rede secundária operam com pacotes de dados com o mesmo tamanho e duração.

4.12.2. Modelo de tráfego para cálculo do atraso médio da rede secundária

Cada usuário secundário pode ocupar dois estados possíveis: *thinking* e *backlogged*. No primeiro, um usuário está com seu *buffer* de uma posição livre e pode gerar um novo pacote com probabilidade σ_{mi} durante um *mini-slot* ou não gerar nenhum com probabilidade $(1-\sigma_{mi})$. No segundo caso, seu *buffer* está ocupado e o usuário não pode gerar nenhum pacote novo [24].

A Figura 4.11 ilustra o novo modelo de tráfego da rede secundária. Durante o período de detecção de portadora de um *time slot* livre, se um usuário gera um novo pacote, ele então *escuta* o meio no ponto de detecção de portadora atual. Se o meio estiver livre, ele inicia imediatamente a transmissão do pacote dentro do *mini-slot* de geração. Se o canal está ocupado, o US desiste e volta a *escutá-lo* com probabilidade σ_{mi} nos *mini-slots* para detecção de portadora dos *time slots* seguintes. Esse processo de detecção de portadora continua até que o US encontre o canal livre e transmita seu pacote com sucesso. Se um US gera um novo pacote durante um *mini-slot* que não pertence ao período de detecção de portadora, o usuário então o armazena em seu *buffer* e volta a *escutar* o meio nos pontos de detecção de portadora dos *time-slots* seguintes, com probabilidade σ_{mi} , repetindo esse processo até encontrar o meio livre e obter sucesso na transmissão do pacote.

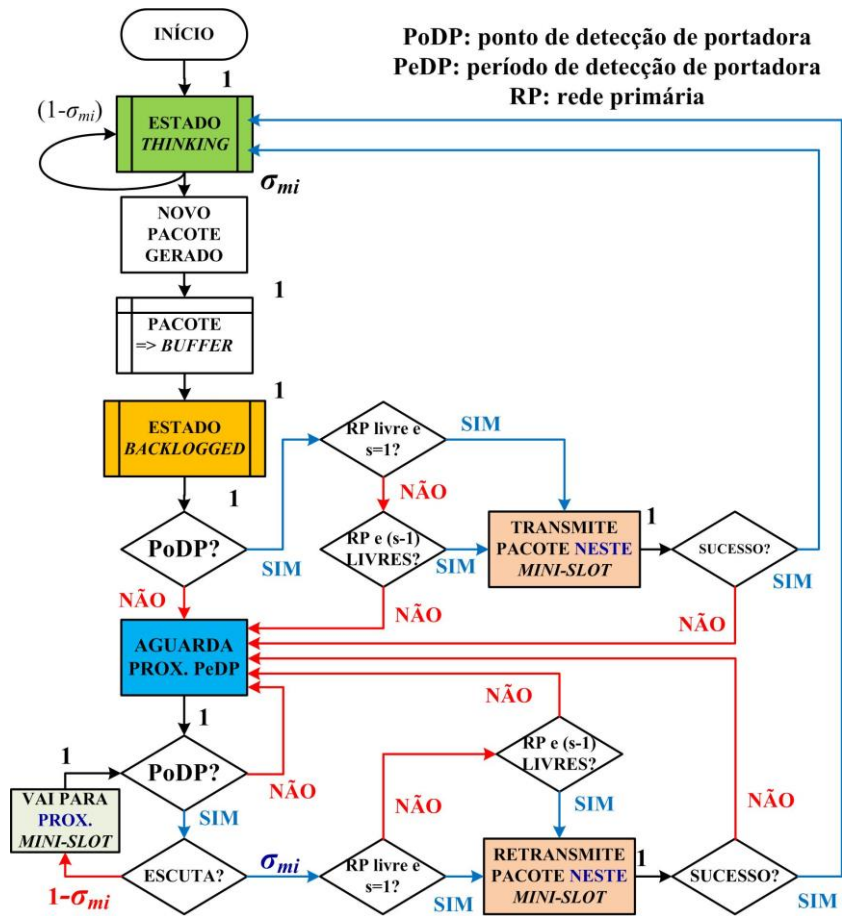


Figura 4.11 – Novo modelo de tráfego para a rede secundária com Slotted CSMA.

4.12.3. Modelo de desvanecimento da rede secundária para o cálculo do atraso médio

Nesta seção também considera-se um canal com desvanecimento segundo a distribuição estatística de Rayleigh. Seja x_s e z_j os respectivos valores instantâneos da potência do sinal dos pacotes de interesse e interferentes e X_s e Z_s , os valores médios da potência recebida do sinal do pacote de interesse e dos pacotes interferentes, respectivamente. As funções de distribuição de probabilidade das potências instantâneas são calculadas conforme as distribuições exponenciais dadas na Eq.(4.19) e na Eq.(4.20) e reproduzidas a seguir [14]:

$$P_x(x_s) = \frac{1}{X_s} e^{-x_s/X_s}, \quad (4.64)$$

$$P_z(z_j) = \frac{1}{Z_s} e^{-z_j/Z_s}. \quad (4.65)$$

4.12.4. Efeito de captura da rede secundária para o cálculo do atraso médio

A probabilidade de que o sinal do pacote de interesse *capture* o ponto de acesso da rede secundária, $P_{scap \rightarrow PAS}$, é calculada conforme a Eq.(4.23) e reproduzida a seguir [14]:

$$P_{scap \rightarrow PAS}(J_s) = \Pr\left(\frac{x_s}{\sum_{j=1}^{J_s} z_j} > R\right) = \left(\frac{1}{R+1}\right)^{J_s}. \quad (4.66)$$

Onde J_s é o número de usuários secundários considerados interferentes em um dado *time slot*, x_s é a potência instantânea do sinal do pacote de interesse, z_j é a potência instantânea dos sinais interferentes e R é a razão de captura.

4.12.5. Cálculo da SIR da rede secundária para o cálculo do atraso médio

Para este método, a SIR média da rede secundária é calculada de acordo com a Eq.(4.50) da Seção 4.6.1, reproduzida a seguir:

$$\Delta_s = \frac{1}{(J_s - 1)}. \quad (4.67)$$

Onde Δ_s é a SIR média para a rede secundária e J_s é o número de USs que estão disputando um dado *time slot*.

4.12.6. Cálculo da PER da rede secundária para o cálculo do atraso médio

A taxa média de erros de pacotes é calculada de acordo com a Eq.(4.51) da Seção 4.6.2, reproduzida a seguir:

$$P_{ave}(\Delta) \cong 1 - e^{-w_0/\Delta}. \quad (4.68)$$

Onde w_0 é um valor constante, calculado conforme dado na Eq.(2.16) da Seção 2.5.2 e Δ representa a SIR média da rede.

4.12.7. Probabilidade de geração de novos pacotes

Seja a estrutura e a sequência de *mini-slots* apresentada na Figura 4.12. Um usuário secundário pode gerar apenas um único pacote por *mini-slot* quando ele estiver no modo *thinking*.

A sequência de *time slots* apresentada na Figura 4.12 é composta por *time slots* livres e ocupados, uma vez que no método apresentado nesta seção considera-se que um US pode gerar um novo pacote em qualquer *mini-slot* desta sequência, desde que ele esteja no modo *thinking* e de maneira independente do estado do *time slot* da rede primária ou dos *mini-slots* da rede secundária.

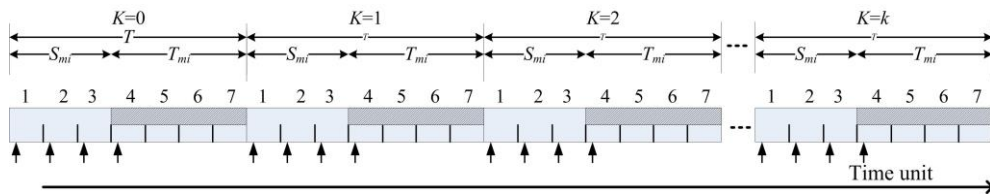


Figura 4.12 – Sequência temporal de *mini-slots*.

A probabilidade de gerar um novo pacote no primeiro *mini-slot* ($S=1$) de um *time slot* com $T=7$ [*mini-slots*] é calculada por:

$$\begin{aligned}
 P_{new} &= P_{new}(S=1) = \sigma_{mi} + (1-\sigma_{mi})^7 \sigma_{mi} + (1-\sigma_{mi})^{14} \sigma_{mi} + \dots + (1-\sigma_{mi})^{7k} \sigma_{mi} \\
 P_{new} &= \sigma_{mi} \sum_{s=0}^{\infty} (1-\sigma_{mi})^{7s}.
 \end{aligned} \tag{4.69}$$

Onde σ_{mi} é a probabilidade de um US em estado *thinking* gerar um novo pacote, $K = (0, 1, 2, \dots)$ é um número inteiro usado para designar a sequência de *time slots*.

A série da Eq.(4.69) converge para o valor mostrado a seguir:

$$P_{new} = \frac{\sigma_{mi}}{1-(1-\sigma_{mi})^T}, \tag{4.70}$$

onde, nesse caso, $T=7$ e representa o número de *mini-slots* contidos em um *time slot*.

De forma análoga, para ($S=s$), com ($1 \leq s \leq T$), a probabilidade de geração de novos pacotes por um US em modo *thinking* é dada por:

$$\begin{aligned}
 P_{new}(S=2) &= (1-\sigma_{mi})\sigma_{mi} + (1-\sigma_{mi})^8 \sigma_{mi} + (1-\sigma_{mi})^{15} \sigma_{mi} + \dots + (1-\sigma_{mi})^{7k+1} \sigma_{mi} \\
 P_{new}(S=3) &= (1-\sigma_{mi})^2 \sigma_{mi} + (1-\sigma_{mi})^9 \sigma_{mi} + (1-\sigma_{mi})^{16} \sigma_{mi} + \dots + (1-\sigma_{mi})^{7k+2} \sigma_{mi} \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 P_{new}(S=7) &= (1-\sigma_{mi})^6 \sigma_{mi} + (1-\sigma_{mi})^{13} \sigma_{mi} + (1-\sigma_{mi})^{20} \sigma_{mi} + \dots + (1-\sigma_{mi})^{7k+6} \sigma_{mi}.
 \end{aligned} \tag{4.71}$$

As probabilidades apresentadas na Eq.(4.71) também convergem para as equações apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned}
P_{new}(S=2) &= (1-\sigma_{mi}) \frac{\sigma_{mi}}{1-(1-\sigma_{mi})^7} = (1-\sigma_{mi}) P_{new} \\
P_{new}(S=3) &= (1-\sigma_{mi})^2 \frac{\sigma_{mi}}{1-(1-\sigma_{mi})^7} = (1-\sigma_{mi})^2 P_{new} \\
&\cdot \\
&\cdot \\
&\cdot \\
P_{new}(S=7) &= (1-\sigma_{mi})^6 \frac{\sigma_{mi}}{1-(1-\sigma_{mi})^7} = (1-\sigma_{mi})^6 P_{new}.
\end{aligned} \tag{4.72}$$

De maneira geral, a probabilidade de geração de um novo pacote por um usuário secundário em modo *thinking* e em um *mini-slot* ($S=s$), com ($1 \leq s \leq T$), é dado por:

$$P_{new}(S=s) = (1-\sigma_{mi})^{(s-1)} \frac{\sigma_{mi}}{1-(1-\sigma_{mi})^T} = (1-\sigma_{mi})^{(s-1)} P_{new}. \tag{4.73}$$

4.12.8. Diagrama em árvore para a rede secundária

Seja a sequência de *time slots* apresentada na Figura 4.12. O período máximo destinado à detecção de portadora é igual a $(S_{mi}+1)$ [*mini-slots*] e a duração do pacote de dados da rede secundária é T_{mi} [*mini-slots*]. Neste caso, um *time slot* tem a duração de T [*mini-slots*] e pode ser calculado por:

$$T = S_{mi} + T_{mi}. \tag{4.74}$$

Para a análise do atraso médio da rede secundária, um usuário desta rede é eleito como sendo o de interesse, isto é, aquele que gera o chamado pacote de interesse. Todos os demais usuários desta rede são considerados então como estações interferentes. Como os usuários secundários podem escutar o meio e é considerado que o processo de detecção é perfeito, os UPs não são considerados como estações interferentes nesta arquitetura.

Um dado *time slot* pode estar sendo usado ou não pelos usuários primários. Se ele estiver ocupado e o usuário secundário de interesse (USI) gera um novo pacote em um dado *mini-slot* desse *time slot*, o pacote é armazenado e a estação tenta transmiti-lo posteriormente nos *time slots* livres, com probabilidade σ_{mi} ou não tenta com probabilidade $(1-\sigma_{mi})$. Se o *time slot* está livre de atividades de UPs e o USI gera um novo pacote no primeiro *mini-slot* do período de detecção de portadora, então o USI transmite imediatamente. Neste caso, se o sinal do USI *captura* o receptor, então a transmissão é considerada realizada com sucesso, assim como ocorre em [14] e o atraso de acesso é nulo ($N=0$). Os *mini-slots* do período de detecção de portadora (S_{mi+1}) de um *time slot* livre de UPs representam o período de vulnerabilidade da rede secundária, isto é, outros USs podem detectá-los livres e também tentarem a transmissão de seus pacotes e, assim ocorrendo, um outro usuário, diferente do USI, pode obter sucesso na transmissão ou retransmissão do seu pacote. Se o USI gera o pacote de interesse em um outro *mini-slot* diferente do primeiro ($1 < S \leq S_{mi+1}$) e o *time slot* ainda é detectado livre de atividades de UPs e outros USs, então o USI tenta transmitir o seu pacote imediatamente e, se obtiver sucesso, o atraso de acesso também tem valor zero ($N=0$). Se o USI gera um pacote fora do período de detecção de portadora ($S_{mi+1} < S \leq T$), então o pacote é armazenado e o USI pode *escutar* o meio com probabilidade σ_{mi} nos próximos *mini-slots* do período de detecção de portadora dos *time slots* seguintes, até que a transmissão seja realizada com sucesso com ($N > 0$).

A sequência de experimentos acima, isto é, se um *time slot* está livre ou não, se o USI gerou ou não o pacote de interesse, se o pacote de interesse foi gerado durante o período de detecção de portadora ou não, se outro US está usando ou não o canal e se o sinal do USI capturou ou não o PAS, pode ser representada em um diagrama de árvore que é usado nesta seção para calcular as probabilidades de atraso de acesso, $P(N=n)$, onde n é um número inteiro que representa o atraso de acesso em unidades de *mini-slots* e $n=(0, 1, 2, \dots)$.

A Figura 4.13 mostra o diagrama em árvore para cálculo da probabilidade $P(N=0)$. Neste exemplo, $S_{mi}=3$ e $T_{mi}=4$. Os usuários da rede primária podem gerar um novo pacote ou realizar uma retransmissão com probabilidade σ_p e os USs, incluindo o USI, podem gerar um novo pacote ou tentar transmiti-lo com probabilidade σ_{mi} . Seja ainda P_{I1} a probabilidade de um *time slot* da rede primária estar livre e P_{B1} , a sua probabilidade de estar ocupado, P_{I2} a probabilidade do *mini-slot* anterior de um *time slot* estar livre e P_{B2} , de estar sendo usado, P_{new} é a probabilidade de USI gerar o pacote de interesse no primeiro *mini-slot* de um *time slot* livre ou ocupado, $P_{ntx}=(1-\sigma_{mi})$ e P_{suc} , a probabilidade de que o sinal do pacote de interesse *capture* o PAS.

Observando o diagrama em árvore da Figura 4.13, a probabilidade de atraso de acesso nulo, $P(N=0)$, pode ser calculada como:

$$P(N = 0) = P_{I1} P_{new} P_{suc} [1 + (1 - \sigma_{mi}) P_{I2} + (1 - \sigma_{mi})^2 P_{I2}^2 + (1 - \sigma_{mi})^3 P_{I2}^3]. \quad (4.75)$$

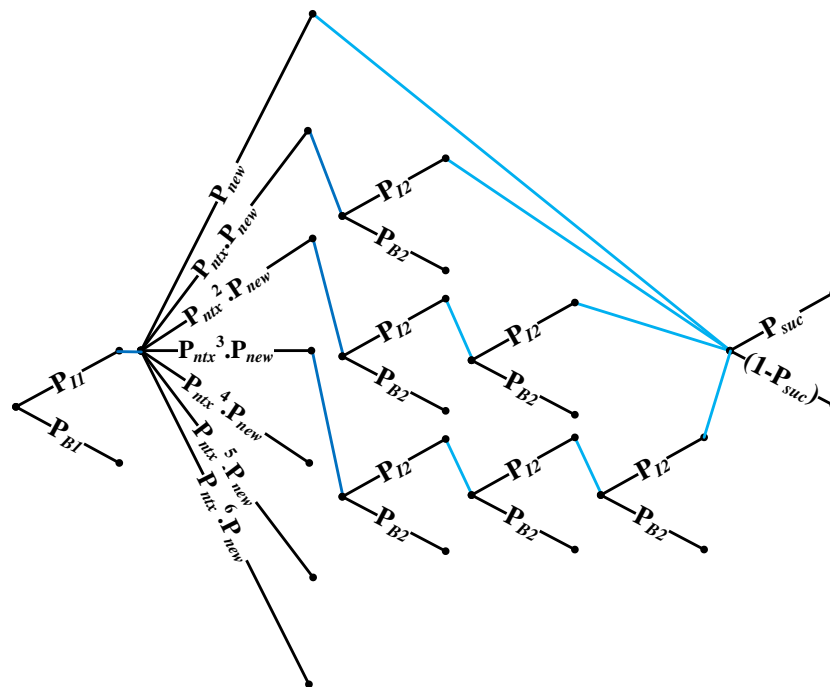


Figura 4.13 – Diagrama em árvore para a probabilidade $P(N=0)$.

Seja agora o experimento onde o atraso de acesso seja $N=1$ [*mini-slot*], conforme ilustrado na Figura 4.14. Considerando ainda que $S_{mi}=3$ e $T_{mi}=4$, a condição $N=1$ ocorre somente quando o pacote de interesse é gerado no último *mini-slot* ($G7$) e transmitido com sucesso a partir do primeiro *mini-slot* do próximo *time slot* ($S1$), desde que ele esteja livre de atividades de UPs. A Figura 4.14 ilustra esta condição.

Analisando o diagrama da Figura 4.14, a probabilidade $P(N=1)$ pode ser calculada como:

$$P(N=1) = P_{ntx}^6 P_{new} P_{I1} P_{tx} P_{suc} \quad (4.76)$$

Onde $P_{tx}=\sigma_{mi}$ representa a probabilidade de que o USI *escute* o meio quando está no estado de *backlogged*.

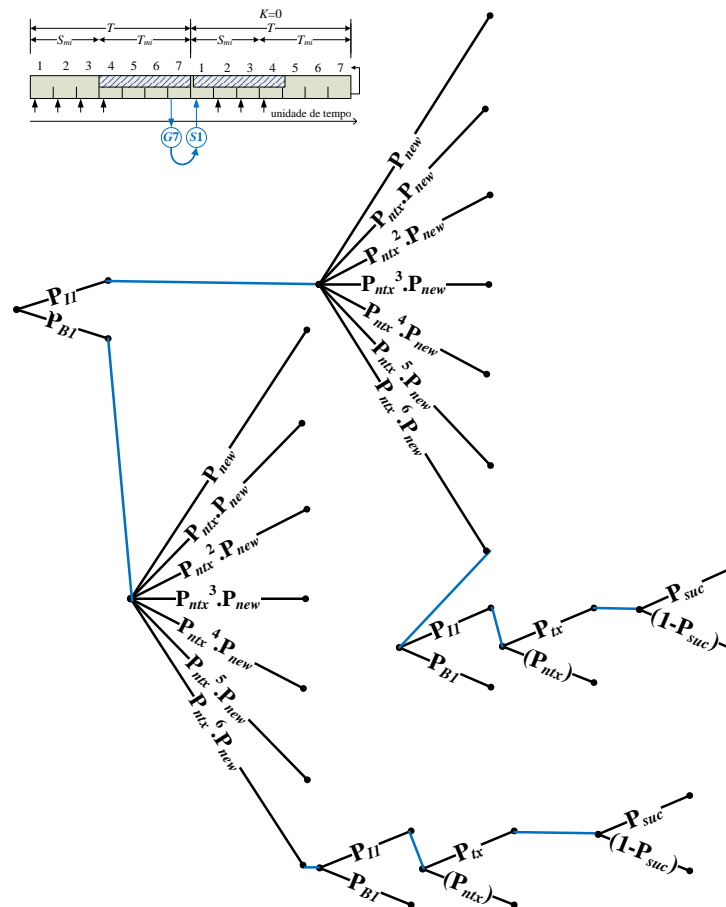


Figura 4.14– Diagrama em árvore para a probabilidade $P(N=1)$.

A Figura 4.15 mostra os experimentos possíveis para que o atraso seja $N=2$, considerando $S_{mi}=3$ e $T_{mi}=4$. A probabilidade $P(N=2)$ pode ser calculada como:

$$P(N=2) = P_{new} P_{I1} P_{tx} P_{suc} (P_{ntx}^5 + P_{I2} P_{ntx}^6). \quad (4.77)$$

Onde P_{I2} é a probabilidade de que um *mini-slot* esteja livre e P_{B2} representa a probabilidade de que um *mini-slot* esteja ocupado por outros USs.

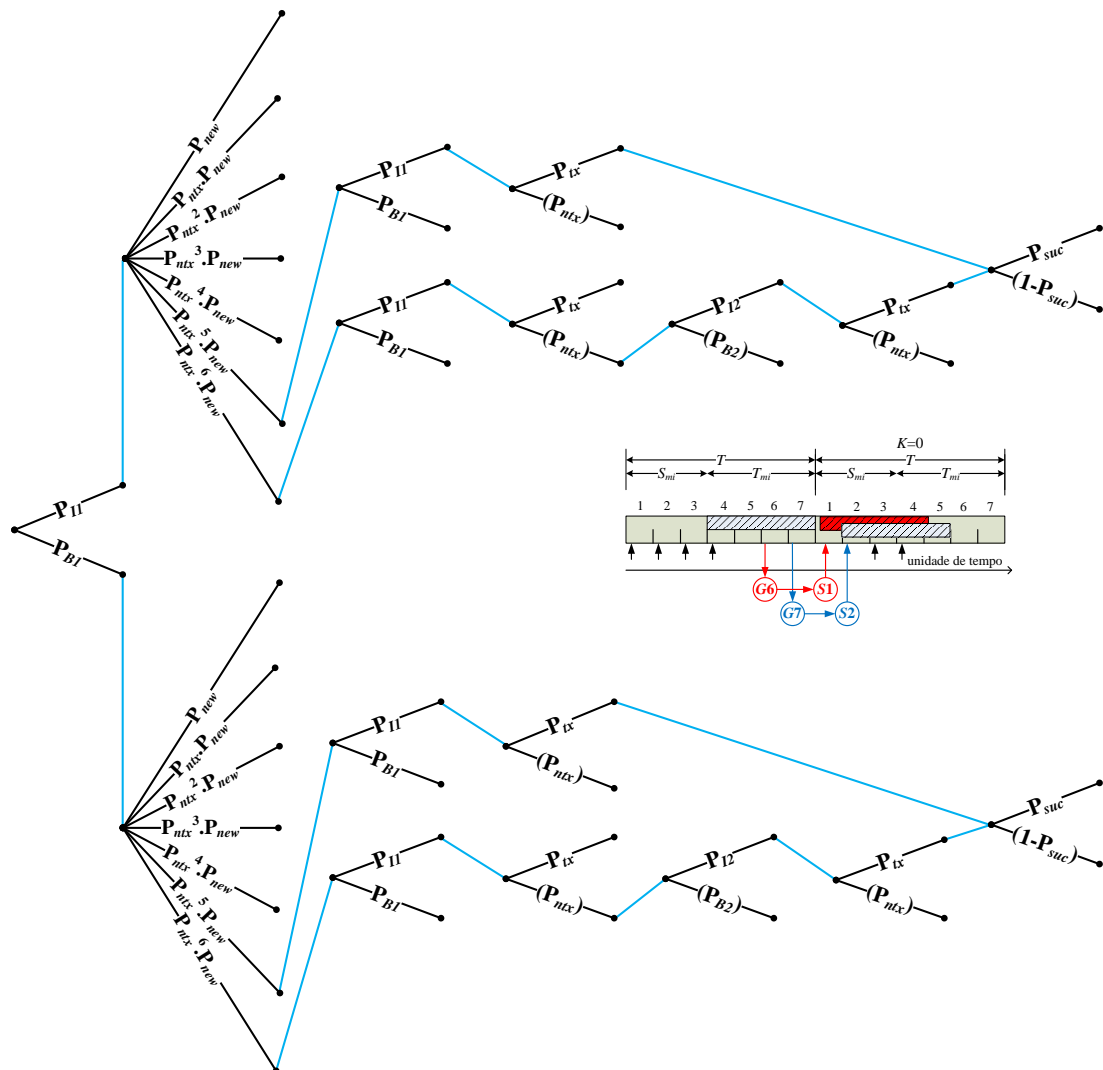


Figura 4.15– Diagrama em árvore para a probabilidade $P(N=2)$.

4.12.9. Cálculo das probabilidades de geração de pacotes e sucesso na transmissão

O objetivo desta seção é obter um conjunto de expressões que permitam calcular o atraso de acesso para qualquer $N=n$, sendo que $n=(1, 2, 3, \dots)$.

Seja $P_{tx}=\sigma_{mi}$, a probabilidade de que um usuário secundário *escute* o meio quando ele possui algum pacote armazenado para transmissão ou retransmissão e $P_{ntx}=(1-\sigma_{mi})$, a probabilidade de que um usuário secundário não *escute* o canal ou de que ele não gere um pacote novo em um dado *mini-slot*. Seja agora $P_G(s)$ a probabilidade de geração de um novo pacote pelo USI no *mini-slot* $S=s$, sendo ($1 \leq s \leq T$). Assim sendo, esta última probabilidade pode ser calculada da seguinte maneira:

$$P_G(s) = (1 - \sigma_{mi})^{s-1} P_{new} = P_{ntx}^{(s-1)} \cdot P_{new}. \quad (4.78)$$

Desta forma, por exemplo, $P_G(1)=P_{new}$ e $P_G(2)=P_{ntx} \cdot P_{new}$ e assim sucessivamente.

Sendo G a carga da rede primária, então a probabilidade de que um usuário da rede primária gere um novo pacote ou inicie a retransmissão de um pacote, σ_p , é calculada por:

$$\sigma_p = \frac{G}{N_p}. \quad (4.79)$$

Onde N_p é o número total de usuários primários. Nesta seção é considerado que $\sigma_{mi}=\sigma_p$.

Seja P_{f1} a probabilidade de que o canal esteja livre, isto é, sem que nenhum UP esteja tentando transmitir dados em um dado *time slot* e P_{f2} a probabilidade de que nenhum US interferente esteja transmitindo pacote quando o USI *escuta* o meio. Estas probabilidades são então calculadas como segue:

$$\begin{aligned}
P_{I1} &= (1 - \sigma_p)^{N_p} \\
P_{B1} &= (1 - P_{I1}) \\
P_{I2} &= (1 - \sigma_{mi})^{(N_s - 1)} \\
P_{B2} &= (1 - P_{I2}).
\end{aligned} \tag{4.80}$$

Onde P_{B1} e P_{B2} representam as probabilidades de que a rede primária e secundária estejam ocupadas, respectivamente e N_s é o número total de usuários da rede secundária.

Denotando $P_s(sm)$ como a probabilidade de que o pacote de interesse seja transmitido com sucesso para o PAS a partir do *mini-slot* sm , ($1 \leq sm \leq S_{mi}+1$), então tem-se:

$$P_s(sm) = P_{I1} P_{suc} P_{I2}^{(sm-1)}. \tag{4.81}$$

Onde P_{suc} é a probabilidade de sucesso na transmissão do pacote em questão e pode ser calculada como a seguir:

$$\begin{aligned}
P_{suc} &= \sum_{j_s=1}^{N_s-1} \binom{N_s-1}{j_s} \sigma_{mi}^{j_s} (1 - \sigma_{mi})^{N_s-1-j_s} P_{scap \rightarrow PAS}(J_s) = \\
&= \sum_{j_s=1}^{N_s-1} \binom{N_s-1}{j_s} \sigma_{mi}^{j_s} (1 - \sigma_{mi})^{N_s-1-j_s} \left(\frac{1}{R+1} \right)^{j_s}.
\end{aligned} \tag{4.82}$$

Onde j_s é o número de USs interferentes durante um *time slot* e R é a razão de captura. Assim sendo, $P_s(1) = P_{I1} P_{suc}$, $P_s(2) = P_{I1} P_{suc} P_{I2}$ e assim sucessivamente.

O USI pode iniciar a transmissão de um pacote em um dado *mini-slot* do período de detecção de portadora de um *time slot* livre e falhar nesta tentativa. A seguir são calculadas as probabilidades de falha para este experimento em cada um dos *mini-slots* onde é possível o envio de dados. A Figura 4.16 mostra ramos de árvores que permitem o cálculo de tais probabilidades de falha.

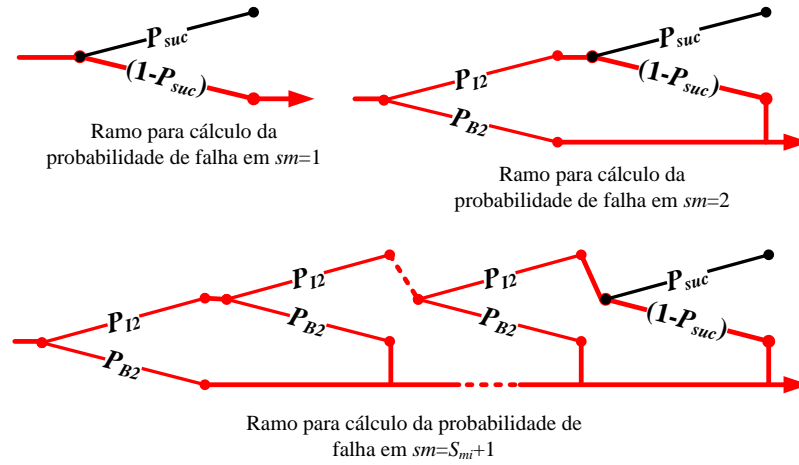


Figura 4.16 – Diagrama em árvore para cálculo das probabilidade de falha de transmissão.

Seja $P_F(sm)$ a probabilidade de que o USI inicie uma transmissão no *mini-slot* sm , ($1 \leq sm \leq S_{mi}+1$) e falhe nesta tentativa. Se o USI detecta o *time slot* livre em $sm=1$ e inicia a transmissão de dados, então a probabilidade de que ocorra falha nesta tentativa, $P_F(1)$, é dada por:

$$P_F(1) = (1 - P_{suc}). \quad (4.83)$$

Se o envio de um pacote de interesse inicia em $sm=2$, admitindo que o período de detecção de portadora tenha pelo menos dois *mini-slots* de duração, então a probabilidade de falha $P_F(2)$ é calculada por:

$$P_F(2) = P_{B2} + P_{I2}(1 - P_{suc}). \quad (4.84)$$

Para o caso geral, a probabilidade de falha quando a transmissão inicia no *mini-slot* $\{1 < sm \leq (S_{mi}+1)\}$ é dada por:

$$P_F(sm) = P_{B2} \sum_{j=2}^{sm} P_{I2}^{(j-2)} + P_{I2}^{(sm-1)}(1 - P_{suc}). \quad (4.85)$$

Existe ainda a possibilidade de que o USI não consiga transmitir em um *time slot* inteiro. Isto pode ocorrer se o *time slot* está ocupado ou ele está livre, mas o USI não tenta *escutar* o meio em nenhum *mini-slot* do período de detecção de portadora, ou quando ele escuta o canal, mas esse já está ocupado por algum US, ou ainda ele

inicia a transmissão em um dado *mini-slot* e falha. Esta probabilidade é representada por P_{FT} e pode ser calculada com ajuda dos ramos do diagrama em árvore da Figura 4.17 da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 P_{FT} = & P_{B1} + P_{I1} [P_{tx} P_F (1) \sum_{j=1}^{S_{mi}+1} (P_{ntx} P_{I2})^{(j-1)} + \\
 & + P_{B2} P_{ntx} \sum_{i=1}^{S_{mi}} (P_{ntx} P_{I2})^{(i-1)} + P_{ntx}^{(S_{mi}+1)} P_{I2}^{S_{mi}}].
 \end{aligned} \tag{4.86}$$

No diagrama em árvore da Figura 4.13 observa-se que $N=0$ se e somente se o pacote é gerado pelo USI durante o período de detecção de portadora de um *time slot* livre e ele é transmitido com sucesso. Na mesma condição, se houver falha na transmissão, então $N>0$. Nesta situação tem-se uma probabilidade condicional, denominada $P_{GF}(s)$, com $(1 \leq s \leq T)$, que representa a condição de que um pacote foi gerado em um *mini-slot* do período de detecção de portadora e não foi recebido corretamente, pois a rede secundária está ocupada ou houve falha de transmissão. A probabilidade condicional $P_{GF}(s)$ pode ser calculada da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 P_{GF}(1) &= P_G(1)P_F(1) \\
 P_{GF}(2) &= P_G(2)P_F(2) \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 P_{GF}(S_{mi}+1) &= P_G(S_{mi}+1)P_F(S_{mi}+1) \\
 P_{GF}(S_{mi}+2) &= P_G(S_{mi}+2) \\
 P_{GF}(T) &= P_G(T).
 \end{aligned} \tag{4.87}$$

Na Eq.(4.87) pode-se ver que quando $(s > S_{mi}+1)$, não existe a probabilidade de transmissão com falha, pois o USI não tenta enviar seu pacote fora do período de detecção de portadora.

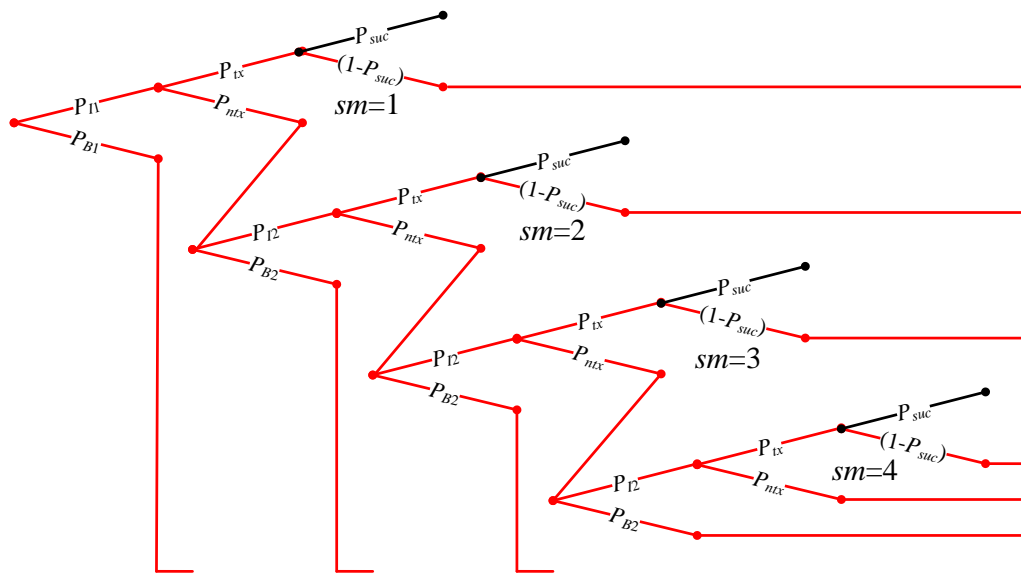


Figura 4.17 – Diagrama em árvore para cálculo da probabilidade de falha (P_{FT}), considerando $S_{mi}=3$.

Por outro lado, se o pacote de interesse for gerado em um *time slot* ocupado, então obtém-se também $N>0$. Nesse último caso, o USI não tenta transmitir mesmo que o pacote seja gerado durante o período de detecção de portadora, não havendo, portanto, a probabilidade condicional mostrada anteriormente. Para fins matemáticos e de simulação, nesta situação a probabilidade $P_{GF}(s)$, para $(1 \leq s \leq T)$, seria obtida como:

$$P_{GF}(s) = P_G(s). \quad (4.88)$$

Onde $P_G(s)$ é dado pela Eq.(4.78).

Para obter a função massa de probabilidade da VA N , que representa o atraso de acesso, em uma fórmula mais compacta e mais fácil de manusear e analisar, ainda é apontada uma outra probabilidade condicional relacionada com o *mini-slot* do período de detecção de portadora em que USI começou a transmitir um pacote de dados e obtém sucesso.

Seja agora sm , $\{1 < sm \leq (S_{mi}+1)\}$, o *mini-slot* do período de detecção de portadora em que o USI *escuta* o meio e inicia a transmissão de um pacote que

redunda em sucesso. Se a transmissão com sucesso inicia em ($sm=2$), então o USI não escutou e não tentou transmitir no *mini-slot* em que ($sm=1$), por exemplo. Então existe uma outra probabilidade condicional de que, em um mesmo *time slot* livre, o USI não escute algum ou alguns *mini-slots* do período de detecção de portadora, mas ele consegue transmitir com sucesso a partir de um determinado *mini-slot* desse *time slot*. Esta probabilidade condicional, denotada por $P_{SN}(sm)$, é calculada por:

$$P_{SN}(sm) = P_{mtx}^{(sm-1)} P_s(sm). \quad (4.89)$$

4.12.10. Cálculo das probabilidades de atraso de acesso na rede secundária

A Figura 4.18 mostra algumas possibilidades de valores para o atraso de acesso, admitindo que o USI tenha gerado um pacote em um *time slot* denominado de *time slot* de geração de pacotes e considerando $S_{mi}=3$ e $T_{mi}=4$.

A Figura 4.18 ilustra também alguns *time slots*, denotados por $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, posteriores ao *time slot* de geração de pacotes, que constituem oportunidades de transmissão caso a mesma não tenha ocorrido com sucesso no *time slot* de geração de pacotes (TSGP).

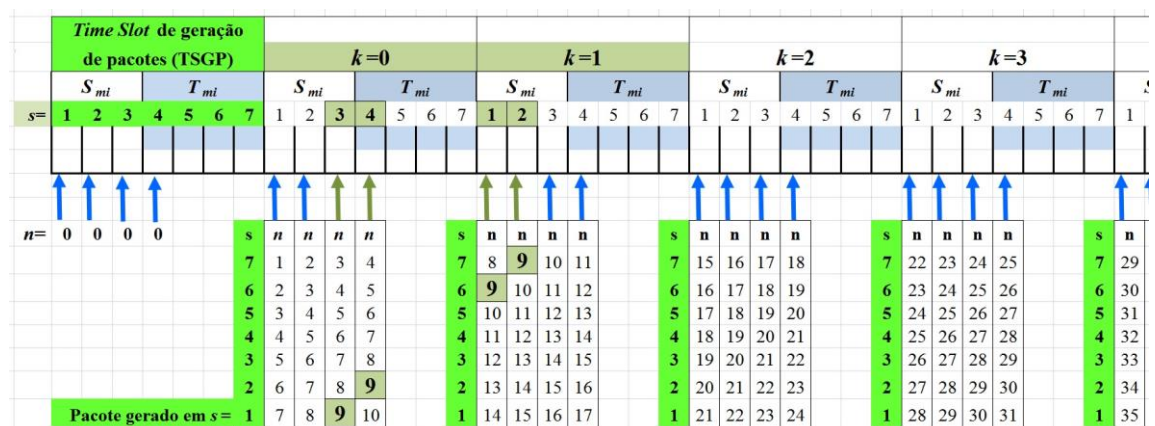


Figura 4.18– Sequência de time slots e valores possíveis para o atraso de acesso.

Observando a Figura 4.18, por exemplo, pode-se observar que há quatro possibilidades para que o atraso de acesso seja $N=9$, conforme mostrado a seguir:

1. o pacote de interesse é gerado no *mini-slot* $s=1$ do time slot de geração de pacotes da Figura 4.18, porém ele não é transmitido ou não é recebido com sucesso durante o TSGP. Nesse caso, o *time slot* TSGP pode estar ocupado, ou a rede secundária pode estar ocupada, ou o USI não tenta transmitir, ou ele envia o pacote, mas ocorre falha. No entanto, no *mini-slot* $sm=3$ do *time slot* $k=0$, o USI envia seu pacote com sucesso e, desta forma, o atraso de acesso é $N=9$;
2. ocorre a geração do pacote no *mini-slot* $s=2$ do *time slot* TSGP da Figura 4.18, porém devido às mesmas causas da possibilidade (1), o pacote não é enviado ou não é recebido corretamente. Nesse caso $N=9$ se o pacote for enviado corretamente no *mini-slot* $sm=4$ do *time slot* $k=0$;
3. a geração do pacote do USI ocorre em $s=6$ do TSGP da Figura 4.18 e é armazenado em seu *buffer*, pois não pode haver transmissão de dados quando ($s > s_{mi} + 1$). Nesse caso, no *time slot* $k=0$ a transmissão não obtém sucesso, pois (1) ou a rede primária está ocupada ou (2) o USI não tenta realizar a transmissão em nenhum *mini-slot* do período de detecção de portadora ou (3), quando ele tenta, a rede secundária está ocupada por algum US interferente ou (4), ele transmite o seu pacote em algum *mini-slot* do período de detecção de portadora do *time slot* $k=0$, porém o sinal do pacote de interesse não *captura* o PAS. A Figura 4.17 ilustra essa situação e a Eq.(4.86) mostra como calcular essa probabilidade. Para que se tenha $N=9$, o USI inicia o envio do pacote, e obtém sucesso, no *time slot* $k=1$ e no *mini-slot* $sm=1$; e,
4. se o pacote de interesse é gerado em $s=7$ do TSGP da Figura 4.18 e é armazenado no USI, pois não pode haver transmissão de dados quando

($s > s_{mi} + 1$). No *time slot* seguinte, $k=0$, o pacote não é enviado, ou não pode ser transmitido, ou ocorre falha na transmissão. A Figura 4.17 ilustra essa situação e a Eq.(4.86) mostra como calcular essa probabilidade. No entanto, se no *time slot* $k=1$ o pacote é enviado com sucesso no *mini-slot* $sm=2$, então tem-se $N=9$.

A Figura 4.19 mostra o diagrama em árvore para a probabilidade $P(N=9)$.

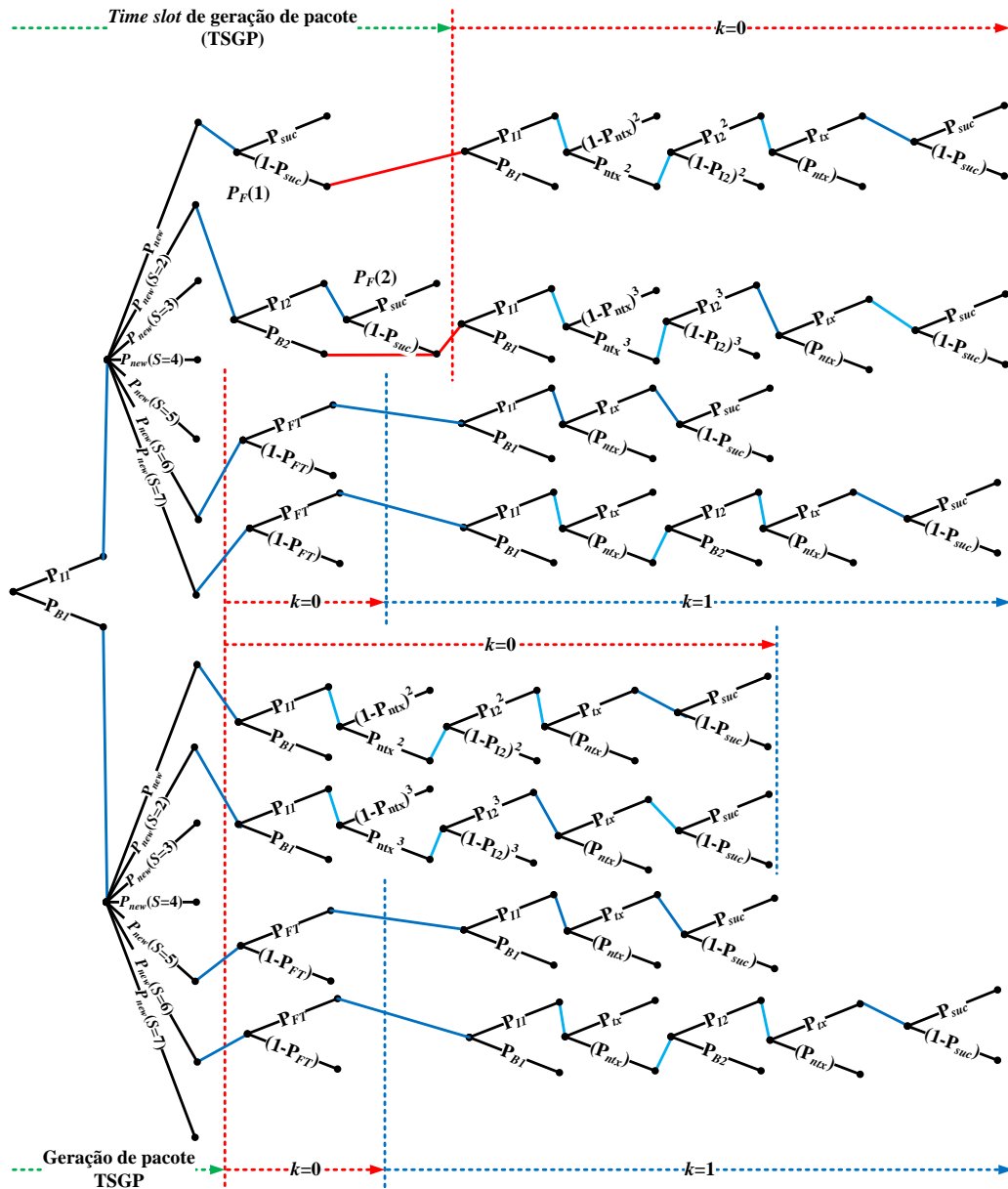


Figura 4.19 – Diagrama de árvore para probabilidade $P(N=9)$.

Pelo diagrama em árvore da Figura 4.19, a probabilidade de atraso de acesso $P(N=9)$, considerando $S_{mi}=3$ e $T_{mi}=4$, é dada por:

$$\begin{aligned}
 P(N=9) = & P_{ix} \{ [P_{I1}(P_{GF}(1)P_{SN}(3) + P_{GF}(2)P_{SN}(4)) + \\
 & + P_{B1}(P_G(1)P_{SN}(3) + P_G(2)P_{SN}(4))] + \\
 & + P_{FT} [P_{I1}(P_{GF}(6)P_{SN}(1) + P_{GF}(7)P_{SN}(2)) + \\
 & + P_{B1}(P_G(6)P_{SN}(1) + P_G(7)P_{SN}(2))] \}.
 \end{aligned} \tag{4.90}$$

Continuando o raciocínio dado acima, a probabilidade $P(N=16)$, considerando $S_{mi}=3$ e $T_{mi}=4$, é dada por:

$$\begin{aligned}
 P(N=16) = & P_{ix} \{ P_{FT} [P_{I1}(P_{GF}(1)P_{SN}(3) + P_{GF}(2)P_{SN}(4)) + \\
 & + P_{B1}(P_G(1)P_{SN}(3) + P_G(2)P_{SN}(4))] + \\
 & + P_{FT}^2 [P_{I1}(P_{GF}(6)P_{SN}(1) + P_{GF}(7)P_{SN}(2)) + \\
 & + P_{B1}(P_G(6)P_{SN}(1) + P_G(7)P_{SN}(2))] \}.
 \end{aligned} \tag{4.91}$$

E assim sucessivamente para $(N=23, 30\dots)$. A Figura 4.20 mostra dois *time slots*, sendo que no primeiro é gerado um pacote no *mini-slot* s , ($1 \leq s \leq T$), e esse pacote é enviado com sucesso no segundo *time slot*, no *mini-slot* sm , ($1 \leq sm \leq S_{mi}+1$).

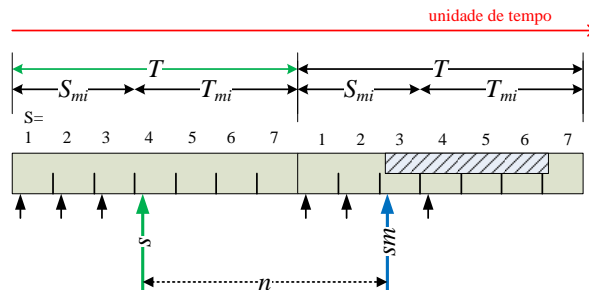


Figura 4.20 – Distância entre transmissão e geração de pacote.

Sendo n o atraso de acesso em unidades de *mini-slots* e supondo que um pacote de interesse foi transmitido com sucesso a partir do *mini-slot* sm , então é possível calcular o *mini-slot* de geração de tal pacote, s . O *mini-slot* s é o índice da probabilidade de geração de pacote, $P_G(s)$ ou a probabilidade de geração e falha de envio do pacote no *time slot* de sua geração, $P_{GF}(s)$. Nesse caso, observando a Figura 4.20, o *mini-slot* s poderia ser calculado como:

$$\begin{aligned} n &= (T - s) + sm \therefore \\ s &= T - n + sm. \end{aligned} \quad (4.92)$$

Considerando que tal pacote foi transmitido com sucesso no *mini-slot* sm do *time slot* k , então, de maneira geral, o valor do *mini-slot* s é dado por:

$$s = T - n + sm. \quad (4.93)$$

Observando a Eq.(4.93), conclui-se que s e sm independem do valor de k . As considerações e equações anteriores permitem obter um expressão geral para o cálculo do atraso de acesso, $P(N=n+kT)$, conforme mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} P(N = n + kT) &= P_{tx} P_{FT}^k [P_{I1} \sum_{i=1}^{L_{sup}} P_{GF}(T - n + i) P_{SN}(i) + \\ &+ P_{B1} \sum_{j=1}^{L_{sup}} P_G(T - n + j) P_{SN}(j)]. \end{aligned} \quad (4.94)$$

Onde k , ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$), é o *time slot* onde ocorre a transmissão com sucesso do pacote de interesse, P_{tx} é a probabilidade de escutar o meio durante o período de detecção de portadora, P_{FT} é a probabilidade de falha ou não transmissão do pacote em um dado *time slot*, P_{I1} é a probabilidade do *time slot* não estar sendo usado por nenhum UP, $P_{GF}(s)$ é a probabilidade de geração do pacote durante o período de detecção de portadora de um *time slot* livre de atividades de UPs, mas que não é recebido corretamente, T é a duração do *time slot* em unidades de *mini-slots*, n

é o valor do atraso de acesso em *mini-slots*, $P_{SN}(sm)$ indica a partir de qual *mini-slot* de um *time slot* livre o pacote foi enviado com sucesso, P_{B1} é a probabilidade do *time slot* estar em uso pelos UPs, $P_G(s)$ é a probabilidade de geração do pacote de interesse em um *mini-slot* s e L_{sup} é obtido conforme mostrado no cálculo da função massa da probabilidade da VA N , que denota o atraso de acesso, $f_N(n)$, apresentada a seguir.

$$f_N(n) = \begin{cases} 0 & n < 0 \\ P(N=0) & n = 0 \\ P_1(N=n+kT) & 1 \leq n < (S_{mi} + 1) \\ P_2(N=n+kT) & (S_{mi} + 1) \leq n < (T + 1) \\ P_3(N=n+kT) & (T + 1) \leq n < (T + S_{mi} + 1). \end{cases} \quad (4.95)$$

Onde ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) é o atraso de acesso em número de *mini-slots*, ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) representa o *time slot* onde ocorre a transmissão com sucesso do pacote de interesse e $P_1(N=n+kT)$, $P_2(N=n+kT)$ e $P_3(N=n+kT)$ são calculados da seguinte forma:

$$P_1(N=n+kT) = \begin{aligned} & P_{tx} P_{FT}^k [P_{I1} \sum_{i=1}^n P_{GF}(T-n+i) P_{SN}(i) + \\ & + P_{B1} \sum_{j=1}^n P_G(T-n+j) P_{SN}(j)]. \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 1 \leq n < S_{mi} + 1 \\ & k = 0, 1, 2, 3, \dots \infty \end{aligned} \quad (4.96)$$

$$P_2(N=n+kT) = \begin{aligned} & P_{tx} P_{FT}^k [P_{I1} \sum_{i=1}^{S_{mi}+1} P_{GF}(T-n+i) P_{SN}(i) + \\ & + P_{B1} \sum_{j=1}^{S_{mi}+1} P_G(T-n+j) P_{SN}(j)]. \end{aligned} \quad \begin{aligned} & S_{mi} + 1 \leq n < T + 1 \\ & k = 0, 1, 2, 3, \dots \infty \end{aligned} \quad (4.97)$$

$$P_3(N=n+kT) = \begin{aligned} & P_{tx} P_{FT}^k [P_{I1} \sum_{i=(n+1)-T}^{S_{mi}+1} P_{GF}(T-n+i) P_{SN}(i) + \\ & + P_{B1} \sum_{j=(n+1)-T}^{S_{mi}+1} P_G(T-n+j) P_{SN}(j)]. \end{aligned} \quad \begin{aligned} & T + 1 \leq n \leq T + S_{mi} \\ & k = 0, 1, 2, 3, \dots \infty \end{aligned} \quad (4.98)$$

4.12.11. Cálculo do atraso médio para a rede secundária sem considerar a PER

O atraso médio da rede secundária é definido como o número médio de *mini-slots* que um usuário secundário demora em transmitir com sucesso seus respectivos pacotes. Logo, considerando um canal com desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh e o efeito de captura, o atraso médio de acesso da rede secundária, D_{sc} , é o valor esperado para a variável aleatória N com função massa de probabilidade dada pela Eq.(4.96), Eq.(4.97) e pela Eq.(4.98) e é calculado como:

$$D_{sc} = \sum_{k=0}^{\infty} (n + kT)P(N = n + kT). \quad (4.99)$$

Onde n , ($0 \leq n < \infty$), é o atraso de acesso, k , ($0 \leq k < \infty$) é o *time slot* no qual o pacote de interesse é transmitido com sucesso.

Nesse primeiro caso, quando o sinal do pacote de interesse *captura* o PAS, a transmissão é considerada realizada com sucesso. Um modelo mais realista deve considerar a PER, o que será feito na seção a seguir.

4.12.12. Cálculo do atraso médio da rede secundária considerando a PER

Nesse segundo caso, um pacote de interesse é considerado recebido com sucesso se o seu sinal *captura* o PAS e o pacote recebido não contém erros devido à interferência entre os usuários da rede. Desta forma, a probabilidade condicional de sucesso quando se considera a PER, P_{suc_new} , é calculada da seguinte maneira:

$$P_{suc_new} = P_{suc} \cdot PSR(\Delta) = P_{suc} \cdot e^{-w_0(J_s)}. \quad (4.100)$$

Onde $PSR(\Delta)$ é a probabilidade de recepção de um pacote sem erros devido à interferência e Δ é o valor médio da SIR, que para a rede secundária é dada por: $\Delta_s = 1/J_s$. P_{suc} é a probabilidade de sucesso de que o sinal do pacote de interesse *capture* o PAS e é calculada a seguir:

$$\begin{aligned}
P_{suc} &= \sum_{j_s=1}^{N_s-1} \binom{N_s-1}{j_s} \sigma_{mi}^{j_s} (1-\sigma_{mi})^{N_s-1-j_s} P_{scap \rightarrow PAS}(J_s) = \\
&= \sum_{j_s=1}^{N_s-1} \binom{N_s-1}{j_s} \sigma_{mi}^{j_s} (1-\sigma_{mi})^{N_s-1-j_s} \left(\frac{1}{R+1} \right)^{j_s}.
\end{aligned} \tag{4.101}$$

Onde j_s é o número de USs interferentes durante um *time slot*, R é a razão de captura, N_s é o número total de usuários da rede secundária, e σ_{mi} é a probabilidade de geração de um novo pacote ou a probabilidade de um US no estado de *backlogged escutar* o meio durante o período de detecção de portadora.

O atraso médio da rede secundária para o novo modelo, D_{scp} , é o valor esperado para a variável aleatória N com função massa de probabilidade dada pela Eq.(4.96), Eq.(4.97) e pela Eq.(4.98) e pode ser calculado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
D_{scp} &= E[N] \\
D_{scp} &= \sum_{k=0}^{\infty} (n+kT)P(N=n+kT).
\end{aligned} \tag{4.102}$$

Onde n é o atraso de acesso e k é o *time slot* no qual o pacote do USI foi transmitido com sucesso.

Nos cálculos de $P(N=n+kT)$ da Eq.(4.102) onde é necessário determinar a probabilidade de sucesso, deve-se usar a Eq.(4.100), que leva em conta a PER.

4.13. Resultado numérico e simulação para o atraso médio da rede secundária

A Figura 4.21 mostra o gráfico para o atraso médio da rede secundária para $N_s=10, 20$ e 30 usuários e $N_p=20$ usuários primários. Este gráfico contém os resultados do cálculo numérico e da simulação por Monte Carlo; esta última foi desenvolvida usando o MATLAB com o objetivo de validar os cálculos apresentados anteriormente nesse capítulo. Observa-se no gráfico da Figura 4.21 que o atraso médio cresce com o número de usuários e com a carga da rede primária.

Para a arquitetura de rede desse capítulo, os resultados numéricos e as simulações apresentadas em [14] consideram os seguintes parâmetros: $N_p=20$ usuários, $N_s=10, 20$ e 30 usuários, $S_{mi}=10$ [mini-slots], $T_{mi}=100$ [mini-slots] e $\sigma_p=\sigma_{mi}$. A Figura 4.22 mostra o resultado numérico e a simulação quando se consideram esses mesmos parâmetros.

O gráfico da Figura 4.23 apresenta as curvas para $N_p=20$ usuários e $N_s=10, 20$ e 30 usuários, considerando o efeito de captura e considerando ou não o efeito da PER devido as interferências na rede.

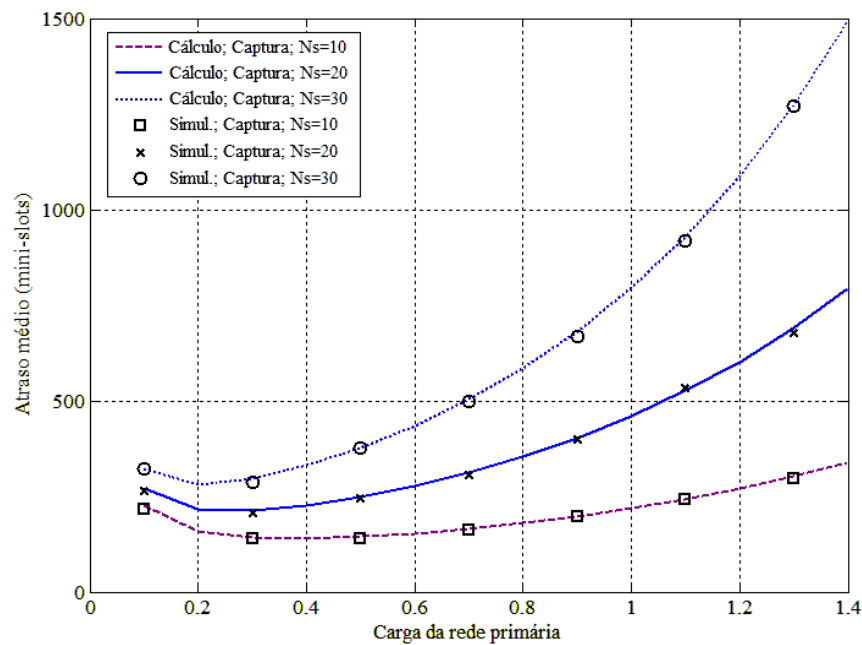


Figura 4.21 – Atraso médio da rede secundária ($N_p=20$, $N_s=10, 20, 30$, $R=3$ dB, $S_{mi}=3$, $T_{mi}=4$, $\sigma_p=\sigma_{mi}$).

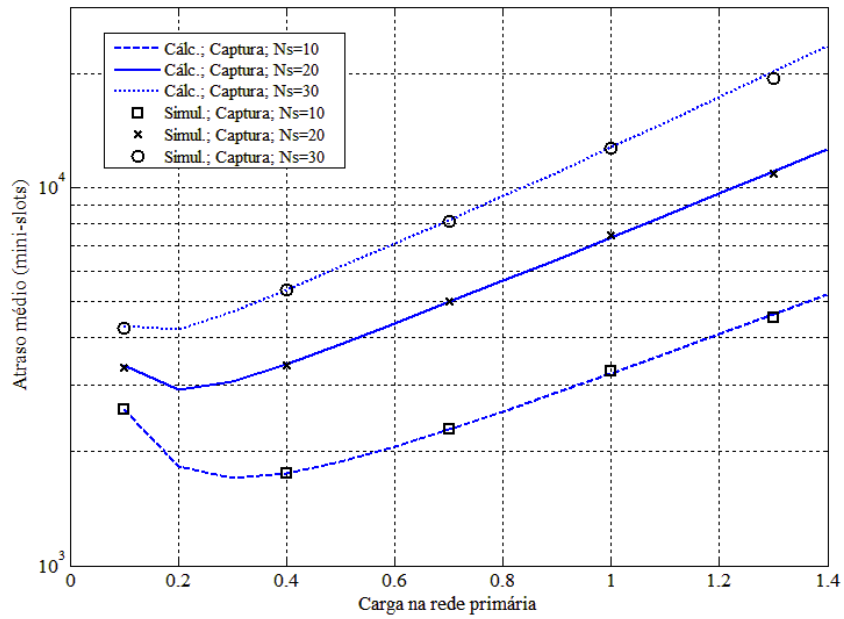


Figura 4.22– Atraso médio da rede secundária ($N_p=20$, $N_s=10, 20, 30$, $R=3$ dB, $S_{mi}=10$, $T_{mi}=100$).

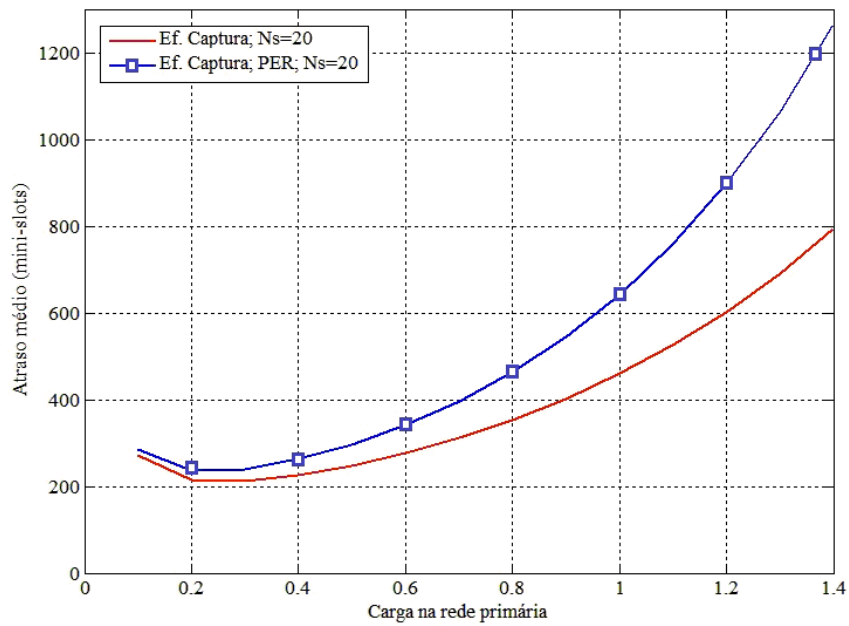


Figura 4.23 – Atraso médio da rede secundária ($R=3$ dB, $S_{mi}=3$, $T_{mi}=4$, $w_0=3,4467$).

Como pode ser observado também no gráfico da Figura 4.23, o atraso médio da rede secundária aumenta quando se considera a PER, devido às interferências na rede, no cálculo desse parâmetro. Assim, a PER não deve ser negligenciada no cálculo do atraso médio.

4.14. Conclusão

Nesse capítulo analisou-se o desempenho, em termos de vazão e atraso médio, da rede primária e secundária de uma arquitetura que usa o protocolo *Slotted Aloha* na rede primária com N_p usuários e *Slotted CSMA* na rede secundária, que possui N_s usuários secundários. No caso da vazão, ainda é estudado o desempenho global das redes. Na análise da vazão das redes são considerados dois modelos: modelo original de [14] e o novo modelo.

No modelo original, as vazões são calculadas considerando um canal com desvanecimento por Rayleigh e o efeito de captura.

Nesse trabalho é proposto um novo modelo que considera um canal com desvanecimento por Rayleigh, o efeito de captura e da PER nos cálculos das vazões das redes, tornando assim este modelo mais realista.

A perda de pacotes ocorre devido à interferência entre os usuários da rede. Em todas as análises de vazão desse capítulo, constata-se que quando a PER é considerada, a vazão diminui. Assim sendo, diferentemente do que é apresentado em [14], a PER não deve ser ignorada nos cálculos das vazões das redes desta arquitetura.

Na análise do atraso médio para a rede primária, verifica-se também que a PER afeta esse parâmetro de desempenho, aumentando o atraso médio da rede primária. Desta forma, deve-se considerar a PER nos cálculos do atraso médio da rede primária.

Adicionalmente, é apresentado um método para o cálculo do atraso médio da rede secundária. O método apresentado é validado por meio de simulação e ele é analisado tanto para um modelo que não considera a PER, quanto para um outro que leva em conta a taxa média de erros de pacotes. A PER também afeta o atraso médio desta rede de maneira significativa e, para tornar o modelo mais realista, ela deve ser considerada nos cálculos.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS

Neste trabalho são estudadas algumas arquiteturas de redes propostas em [14], onde o desempenho, em termos de vazão e atraso médio, é analisado considerando o efeito de captura. Em seguida, é proposto um novo modelo que analisa o desempenho dos sistemas de [14], considerando a taxa média de erros de pacotes e tornando assim o modelo mais realista.

Adicionalmente, foi desenvolvido e apresentado um método para cálculo do atraso médio para a rede secundária da arquitetura do Capítulo 4 deste trabalho. Em [14], tal cálculo é proposto como sugestão de estudo futuro. Para validar os cálculos numéricos apresentados, uma simulação de computador foi desenvolvida usando o MATLAB.

No modelo original, as arquiteturas de redes propostas são analisadas considerando vários protocolos MAC. Dos protocolos analisados em [14], as seguintes combinações foram consideradas neste trabalho: (1) na rede primária usa-se o protocolo *Slotted Aloha* e (2) na rede secundária empregam-se os protocolos *Slotted Aloha* e *Slotted CSMA*.

No modelo original, o pacote de interesse é considerado transmitido com sucesso se o seu sinal *captura* o ponto de acesso de sua respectiva rede. No entanto, as interferências entre as estações das redes podem causar erros nos pacotes recebidos e, desta forma, vários métodos propostos para cálculo da taxa média de erros de pacotes foram estudados e o método apresentado em [17] foi o escolhido para analisar o efeito da PER sobre o desempenho das arquiteturas de redes do modelo original.

É bom salientar que tanto o modelo original, quanto o método de cálculo da PER de [17] foram validados por simulações de computador.

A conclusão obtida analisando os cálculos numéricos e gráficos apresentados neste trabalho é de que a PER afeta o desempenho das redes, diminuindo a vazão e

aumentando o atraso médio de acesso normalizado. Dessa forma, a taxa média de erros de pacotes deve ser considerada em tais cálculos, diferentemente do que ocorre em [14].

5.1. Contribuições desse trabalho

As principais contribuições desta dissertação são apresentadas a seguir:

1. proposta de dois novos modelos para o cálculo da vazão e do atraso médio para as arquiteturas de rede baseadas em protocolos *Slotted Aloha* e *Slotted CSMA*, considerando o efeito da PER sobre os métodos propostos em [14] e tornando assim os modelos mais realistas;
2. desenvolvimento de um método para cálculo do atraso médio da rede secundária da arquitetura apresentada no Capítulo 4.

5.2. Publicações

Durante o trabalho de pesquisa, foram elaborados e publicados três artigos, conforme mostrados a seguir.

- a) Análise da vazão em redes de rádios cognitivos usando *Slotted Aloha*, publicado no XXX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBrT’12, 13 a 16 de setembro de 2012, BRASÍLIA, DF;
- b) *AVERAGE DELAY IN COGNITIVE RADIO NETWORKS USING SLOTTED ALOHA*, publicado na *5th International Conference on Communications, Computers and Applications*, 12 a 14 de outubro de 2012, Istambul, Turquia.

- c) *A New Throughput Analysis in Cognitive Radio Networks Using Slotted CSMA*, publicado na *The Third International Conference on Advances in Cognitive Radio*, COCORA 2013, 21 a 26 de abril de 2013, em Veneza, Itália.

5.3. Propostas de trabalho futuro

Para trabalhos futuros fica uma questão a ser investigada. Considerando o novo modelo apresentado nos Capítulos 3 e 4 e o cálculo do atraso médio para a rede secundária, apresentada no Capítulo 4, técnicas de modulação e codificação de canal poderiam ser consideradas e analisadas com o objetivo de reduzir a PER e assim melhorar o desempenho das redes. Além disso, novos modelos podem ser desenvolvidos para considerar as imperfeições no processo de detecção de portadora na rede secundária.

Também pode ser considerada uma extensão do modelo de análise utilizado nesse trabalho aos demais protocolos originalmente tratados em [14], a saber: TDMA e *Packet Reservation Multiple Access (PRMA)*.

ANEXO A – DEDUÇÃO DA PROBABILIDADE DE CAPTURA PARA A REDE PRIMÁRIA

A probabilidade de captura do sinal do pacote de interesse de um usuário primário é dada por [14]:

$$P_{cap \rightarrow PAP}(I_p, J_s) = \Pr \left(\frac{x_p}{\sum_{i=1}^{I_p-1} y_i + \sum_{j=1}^{J_s} z_j} > R \right). \quad (\text{A.1})$$

Onde I_p e J_s representam o número de UPs e USs que estão tentando transmitir no início de um *time slot*, respectivamente, x_p é a potência instantânea do sinal do pacote de interesse de um UP, y_i e z_j são as potências instantâneas interferentes devido às transmissões dos UPs e USs, respectivamente e R é a razão de captura.

A função de distribuição de probabilidade conjunta da potência do sinal do pacote de interesse e da potência dos sinais interferentes é calculada por meio de [14]:

$$f(x_p, y_1, \dots, y_{I_p-1}, z_1, \dots, z_{J_s}) = \frac{1}{X_p} e^{-\frac{x_p}{X_p}} \times \prod_{i=1}^{I_p-1} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \prod_{j=1}^{J_s} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_j}{Z}}, \quad (\text{A.2})$$

onde X_p é o valor médio da potência do sinal do pacote de interesse, Y e Z representam a potência média dos sinais interferentes, sendo que em [14], $X_p=Y$ e $\gamma=X_p/Z$.

Seja $I_p=2$ e $J_s=2$. Neste caso há 3 estações interferentes e a probabilidade de captura do UP que transmite o sinal de interesse é dada por:

$$\begin{aligned}
P_{pcap \rightarrow PAP}(2,2) &= \Pr\left(\frac{x_p}{y_1 + z_1 + z_2} > R\right) = \\
&= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{R(y_1+z_1+z_2)}^\infty \frac{1}{X_p} e^{-\frac{x_p}{X_p}} dx_p \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_1}{Y}} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_1}{Z}} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_2}{Z}} dy_1 dz_1 dz_2.
\end{aligned} \tag{A.3}$$

Fazendo $A=1/X_p$, $B=1/Y$ e $C=1/Z$, então tem-se:

$$\begin{aligned}
P_{pcap \rightarrow PAP}(2,2) &= \Pr\left(\frac{x_p}{y_1 + z_1 + z_2} > R\right) = \\
&= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{R(y_1+z_1+z_2)}^\infty A e^{-Ax_p} dx_p B e^{-By_1} C e^{-Cz_1} C e^{-Cz_2} dy_1 dz_1 dz_2 = \\
&= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{R(y_1+z_1+z_2)}^\infty -e^{-Ax_p} \Big|_{R(y_1+z_1+z_2)}^\infty B e^{-By_1} C e^{-Cz_1} C e^{-Cz_2} dy_1 dz_1 dz_2 = \\
&= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-AR(y_1+z_1+z_2)} B e^{-By_1} C e^{-Cz_1} C e^{-Cz_2} dy_1 dz_1 dz_2 = \\
&= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty B e^{-y_1(AR+B)} C e^{-z_1(AR+C)} C e^{-z_2(AR+C)} dy_1 dz_1 dz_2 = \\
&= \frac{B}{AR+B} \cdot \frac{C}{AR+C} \cdot \frac{C}{AR+C} = \frac{B}{AR+B} \cdot \left(\frac{C}{AR+C}\right)^2 = \\
&= \frac{1/Y}{R/X_p + 1/Y} \cdot \left(\frac{1/Z}{R/X_p + 1/Z}\right).
\end{aligned} \tag{A.4}$$

Simplificando a Eq.(A.4), obtém-se:

$$P_{pcap \rightarrow PAP}(2,2) = \left(\frac{1}{R+1}\right) \left(\frac{\gamma}{R+\gamma}\right)^2. \tag{A.5}$$

Sendo $I_p=2$ e $J_s=2$, então, de maneira geral, tem-se [14]:

$$P_{pcap \rightarrow PAP}(I_p, J_s) = \left(\frac{1}{R+1}\right)^{I_p-1} \left(\frac{\gamma}{R+\gamma}\right)^{J_s}. \tag{A.6}$$

ANEXO B – DEDUÇÃO DA PROBABILIDADE DE CAPTURA PARA A REDE SECUNDÁRIA

Seja um dado *time slot* ocioso onde há três usuários secundários tentando transmitir seus pacotes ($J_s=3$), sendo que um deles transmite o pacote considerado de interesse. Seja $Z_1=Z_2=Z$ e $1/X_s=C$ e $1/Z=D$. Assim Sendo, a probabilidade de captura do pacote de interesse seria:

$$\begin{aligned}
 P_{scap \rightarrow PAS}(3) &= \Pr\left(\frac{x_s}{\sum_{j=1}^2 z_j} > R\right) = \\
 &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{R(z_1+z_2)}^\infty \frac{1}{X_s} e^{-\frac{x_s}{X_s}} dx_s \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_1}{Z}} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_2}{Z}} dz_1 dz_2 = \\
 &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{R(z_1+z_2)}^\infty C e^{-Cx_s} dx_s D e^{-Dz_1} D e^{-Dz_2} dz_1 dz_2 = \\
 &= \int_0^\infty \int_0^\infty C \left(-\frac{1}{C}\right) e^{-Cx_s} \Big|_{Rz_1+Rz_2}^\infty D e^{-Dz_1} D e^{-Dz_2} dz_1 dz_2
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

Onde x_s é a potência instantânea do sinal do pacote de interesse, z_j é a potência instantânea do sinal interferente, R é a razão de captura, X_s é a potência média do sinal do pacote de interesse e Z é o valor esperado para a potência do sinal interferente.

$$\begin{aligned}
 P_{scap \rightarrow PAS}(3) &= \\
 &= \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-CRz_1} e^{-CRz_2} D e^{-Dz_1} D e^{-Dz_2} dz_1 dz_2 = \\
 &= \int_0^\infty \int_0^\infty D e^{-z_1(CR+D)} D e^{-z_2(CR+D)} dz_1 dz_2 = \\
 &= \left(-\frac{D}{CR+D}\right) e^{-z_1(CR+D)} \Big|_0^\infty \cdot \int_0^\infty D e^{-z_2(CR+D)} dz_2 = \\
 &= \left(-\frac{D}{CR+D}\right) \cdot \left(-\frac{D}{CR+D}\right) e^{-z_1(CR+D)} \Big|_0^\infty = \\
 &= \left(\frac{D}{CR+D}\right)^2.
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

De [14], $X_s=Z_s=Z$ e, portanto, $C=D$. Portanto, a probabilidade de captura do pacote de interesse na rede secundária com $J_s=3$ e calculada como a seguir:

$$P_{scap \rightarrow PAS}(3) = \left(\frac{1}{R+1} \right)^2, \quad (\text{B.3})$$

onde $J_s=3$ e $(J_s-1)=2$. Desta forma tem-se de maneira geral [14]:

$$P_{scap \rightarrow PAS}(J_s) = \left(\frac{1}{R+1} \right)^{J_s-1} \quad (\text{B.4})$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Hossain, D. Niyato and Z. Han, "Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks", 1st ed., New York, NY: Cambridge University Press, 2009, ch.1-3, pp.3-95.
- [2] I.F. Akyildiz, W.Y. Lee, M.C. Vuran and S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, issue:4, Apr. 2008, pp. 40-48.
- [3] I.F. Akyildiz, W.Y. Lee, M.C. Vuran and S. Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey," *Comput. Networks*, vol. 50, issue:13, May 2006, pp. 2127-2159.
- [4] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, Feb. 2005, pp. 201-220.
- [5] A. De Domenico, E. C. Strinati and M. Di Benedetto, "A Survey on MAC Strategies for Cognitive Radio Networks," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 14, issue:1, Feb. 2012, pp. 21-44.
- [6] J. Strassner, "The role of autonomic networking in cognitive networks," in *Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks*, 1st ed., New York, NY: Wiley, 2008, ch. 2, pp. 23-52.
- [7] P. Kolodzy et al, "Spectrum Policy Task Force seeks public comment on issues related to commission's spectrum policies," The Federal Communications Commission (FCC), Indianapolis, IN, ET Docket No. 02-135, 2002.

- [8] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, Mar. 2009, pp. 116-130.
- [9] J. Mitolla III, "Cognitive Radio - An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio," Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [10] Federal Communications Commission, "Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies," FCC 03-322, ET Docket No. 03-108, Dec. 2003.
- [11] A. Popescu, "Cognitive Radio Networks," in *9th International Conf. on Communications 2012*, Bucharest, Romania, pp. 11-15.
- [12] E. Hossain, D. Niyato and Z. Han, "Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks," Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009, ch: 7-10, pp. 223-369. (110)
- [13] R. V. Prasad, P. Pawelczak, J. A. Hoffmeyer and H. S. Berger, "Cognitive functionality in next generation wireless networks: standardization efforts," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 46, issue:4, Apr. 2008, pp. 72-78.
- [14] Z. Yang, "Investigations of multiple access protocols in cognitive radio networks," Ph.D. dissertation, Dept. of Elect. and Comput. Eng., Stevens Inst. of Technology, Hoboken, NJ, 2010.
- [15] C. Cormio and K. R. Chowdhury, "A survey on MAC protocols for cognitive radio networks," *Elsevier: Ad Hoc Networks journal*, vol. 7, issue:7, Sep. 2009, pp. 1315–1329.
- [16] J. Linnartz, "Narrowband land-mobile radio networks," Boston, MA: Artech House, 1993, ch. 7, pp. 193-232.

- [17] Y. Xi, A. Burr, J. Wei and D. Grace, "A general upper bound to evaluate packet error rate over quasi-static fading channels," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 10, no. 5, May 2011, pp. 1373-1375.
- [18] K. Fukawa, H. Suzuki and Y. Tateishi, "Packet-Error-Rate analysis using Markov models of the signal-to-interference ratio for mobile packet systems," *IEEE Trans. on Veh. Technology*, vol. 61, issue:6, Jul. 2012, pp. 2517-2530.
- [19] A. Goldsmith, "Wireless Communications," 1st ed., New York, NY: Cambridge University Press, 2005, ch. 1-3, pp. 1-82.
- [20] W. Stallings, "Wireless Communications and Networks," 2nd ed., Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall, 2004, ch. 5, pp. 95-123.
- [21] G. L. Stüber, "Principles of Mobile Communication," 2nd ed., Norwell, MA: Kluwer Academics Publishers, 2000, ch. 1-3.
- [22] N. Lynn, "Data Rate Adaptation and Cooperative Diversity for Future Wireless Communications," Ph.D. dissertation, Graduate School of Science and Technology, Keio University, Yokohama, Japan, 2011.
- [23] P. Stavroulakis, "Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems," Norwood, MA: Artech House, 2003, ch. 1-5, pp. 13-272.
- [24] R. Rom and M. Sidi, "Multiple access protocols performance and analysis," 1st ed., New York, NY: Springer-Verlag, 1990.
- [25] Y. Liang, K. Chen, G. Y. Li and P. Mähönen, "Cognitive radio networking and communications: an overview," *IEEE Trans. on Veh. Technology*, vol. 60, issue:7, Jun. 2011, pp. 3386-3407.

- [26] K. Whitehouse et al, "Exploiting the capture effect for collision detection and recovery," in *2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors 2005*, Sydney, Australia, pp. 45-52.
- [27] D.A. Guimarães, "Digital Transmission, Signals and Communication Technology," Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [28] J. Li, A. Bose and Y. Q. Zhao, "Rayleigh Flat Fading Channels' Capacity," In *Proc. Commun. Networks and Services Research Conf. 2005*, Halifax, NS, Canada, pp. 214-217.
- [29] F. Vihlborg, "On Models for Interference Calculations between Radio Communication Systems," M.S. Thesis, KTH, Signal Processing, Stockholm, Sweden, 2011.
- [30] S. Kucera, S. Aissa and S. Yoshida, "Adaptive channel allocation for enabling target SINR achievability in power-controlled wireless networks," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 9, issue:2, Feb. 2010, pp. 833-843.
- [31] A. Paul et al, "Interference protection criteria," U.S. Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, Washington, DC, NTIA 05-432, 2005.
- [32] Y. Onozato, J. Liu and S. Noguchi, "Stability of a slotted Aloha system with capture effect," *IEEE Trans. on Veh. Technology*, vol. 38, no. 1, Feb. 1989, pp. 31-36.
- [33] D. Dardari, V. Tralli and R. Verdone, "On the capacity of slotted Aloha with Rayleigh fading: the role played by the number of interferers," *IEEE Commun. Letters*, vol. 4, issue:5, May 2000, pp. 155-157.
- [34] A. Zahedi and K. Pahlavan, "Throughput of a wireless LAN access point in presence of natural hidden terminals and capture effects," *17th IEEE*

International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 1996, PIMRC'96., Taipei, Taiwan, vol. 2, pp. 397-401.

- [35] N. C. Huan, N. T. Tung and N. T. Duc, "Bit and packet error rates in Rayleigh fading channels with and without diversity," Aalborg University, Institute of Electronic Systems, Aalborg, Denmark, 2003.
- [36] R. Khalili and K. Salamatian, "A new analytic approach to evaluation of packet error rate in wireless networks," in *Proc. Commun. Networks and Services Research Conf.* 2005, Halifax, Canada, pp. 333-338.
- [37] H. Bai and M. Atiquzzaman, "Error modeling schemes for fading channels in wireless communication: a survey," *IEEE Commun. Survey & Tutorials*, vol. 5, no. 2, Dec 2003, pp. 2-9.
- [38] C. Wang and W. Xu, "Packet-level error models for digital wireless channels," in *IEEE International Conf. on Commun.* 2005 (ICC 2005), Seoul, South Korea, vol. 4, pp. 2184-2189.
- [39] H. Bischl and E. Lutz, "Packet error rate in the non-interleaved Rayleigh channel," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, Feb./Mar./Apr. 1995, pp. 1375-1382.
- [40] E. N. Gilbert, "Capacity of a Burst-Noise Channel," *Bell System Technical Journal*, vol. 39, issue: 5, Sep. 1960, pp. 1253–1265.
- [41] E. O. Elliott, "Estimates of Error Rates for Codes on Burst-Noise Channels," *Bell System Technical Journal*, vol. 42, issue:5, Sep. 1963, pp. 1977–1997.
- [42] B.D. Fritchman, "A binary channel characterization using partitioned Markov chains," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 13, no. 2, Apr. 1967, pp. 221-227.

- [43] J.R. Yee and E. J. Weldon, "Evaluation of the performance of error-correcting codes on a Gilbert channel," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 43, no. 6, Aug. 1995, pp.2316-2323.
- [44] J. Arauz, P. Krishnamurthy and M.A. Labrador, "Discrete Rayleigh fading channel modeling," *Wireless Commun.and Mobile Computing*, vol. 4, issue:4, jun. 2004, pp. 413-425.
- [45] J.P. Ebert and A. Willy, "A Gilbert-Elliott bit error model and the efficient use in packet level simulation," TKN Techn. Rep., Tech. University Berlin, Berlin, rep. 99-002, 1999.
- [46] C.C. Tan and N.C. Beaulieu, "On first-order Markov modeling for the Rayleigh fading channel," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 41, no. 12, Dec. 2000, pp. 2032-2040.
- [47] G. Sharma, A. Dholakia and A. Hassan, "Simulation of error trapping decoders on a fading channel," In. *Proc IEEE Veh. Technology Conf.* 1996, Atlanta, GA, vol. 2, pp. 1361-1365.
- [48] H. Labiod, "Performance of Reed Solomon error-correcting codes fading channels," in 1999 *IEEE Int. Conf. on Personal Wireless Commun.*,Jaipur, India, pp. 259-263.
- [49] A. M. Wyglinski, M. Nekovee and Y. T. Hou (Eds), "Cognitive Radio Communications and Networks Principles and Practice," Burlington, MA:Elsevier, 2009.
- [50] J. M. C. Brito, "Múltiplo acesso em redes de telecomunicações," Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Eletrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1998.

- [51] M. C. Vuran and I. F. Akyildiz, "A-MAC: Adaptive medium access control for next generation wireless terminals," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, issue:3, Jun. 2007, pp. 574-587.
- [52] H. Khalil, "Stochastic Modelling for Wireless Communication Networks-Multiple Access Methods," Department of Mathematics, Uppsala University, Uppsala, Sweden, U.U.D.M. Project Report 2003, 2003.
- [53] J. Riihijarvi, R. Agusti (Eds) et al, "Flexible and spectrum-aware radio access through measurements and modelling in cognitive radio systems," Faramir Project, Document: D2.1, 2010, available at: http://www.ict-faramir.eu/fileadmin/user_upload/deliverables/FARAMIR-D2.1-Final.pdf (last access: on Dec. 2013).
- [54] A. Popescu, "Cognitive Radio Networks: Elements and Architectures," Ph.D. dissertation, School of Computing, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden, 2012.
- [55] F.A. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet switching in radio channels: part IV - stability considerations and dynamic control in carrier sense multiple access," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 25, issue:10, Oct. 1977, pp. 1103-1119.
- [56] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A survey of dynamic spectrum access," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, issue:3, May 2007, pp. 79-89.
- [57] S. Abukharis, R. MacKenzie and T. O'Farrell, "Throughput and delay analysis for a differentiated p-persistent CSMA protocol with the capture effect," in In. Proc *IEEE Veh. Technology Conf.* 2011 (VTC Spring), Budapest, Hungary, pp. 1-5.
- [58] T. C. Clancy, "Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks," Ph.D. dissertation, Dept. of Comput. Science, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, MD, 2006.

- [59] F. E. Lopiccirella, S. Huang, X. Liu and Z. Ding, "Feedback-based access and power control for distributed multiuser cognitive networks," in 2009 *Information Theory and Applications Workshop*, San Diego, CA, pp.85-89.
- [60] L. Ding et al, "Cross-layer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks," *IEEE Trans. on Veh. Technology*, vol. 59, issue:4, May 2010, pp. 1969-1979.
- [61] S. Srinivasa and S. A. Jafar, "How much spectrum sharing is optimal in cognitive radio networks" *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 7, issue:10, Oct. 2008, pp. 4010-4018.
- [62] L. Berlemann et al, "Cognitive radio and management of spectrum and radio resources in reconfigurable networks: white paper," in 2005 *Wireless World Research Forum Working Group 6*, Paris, France.
- [63] D. Cabric, S. M. Mishra and R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," in 2004 *Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Monterey, CA, vol. 1, pp. 772-776.
- [64] Y. Liang, Y. Zeng, E. C.Y. Peh and A. T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 7, issue:4, Apr. 2008, pp. 1326-1337.

APÊNDICE I – DIAGRAMA DE FLUXO DE DADOS PARA A SIMULAÇÃO PARA O ATRASO MÉDIO DA REDE SECUNDÁRIA COM PROTOCOLO CSMA

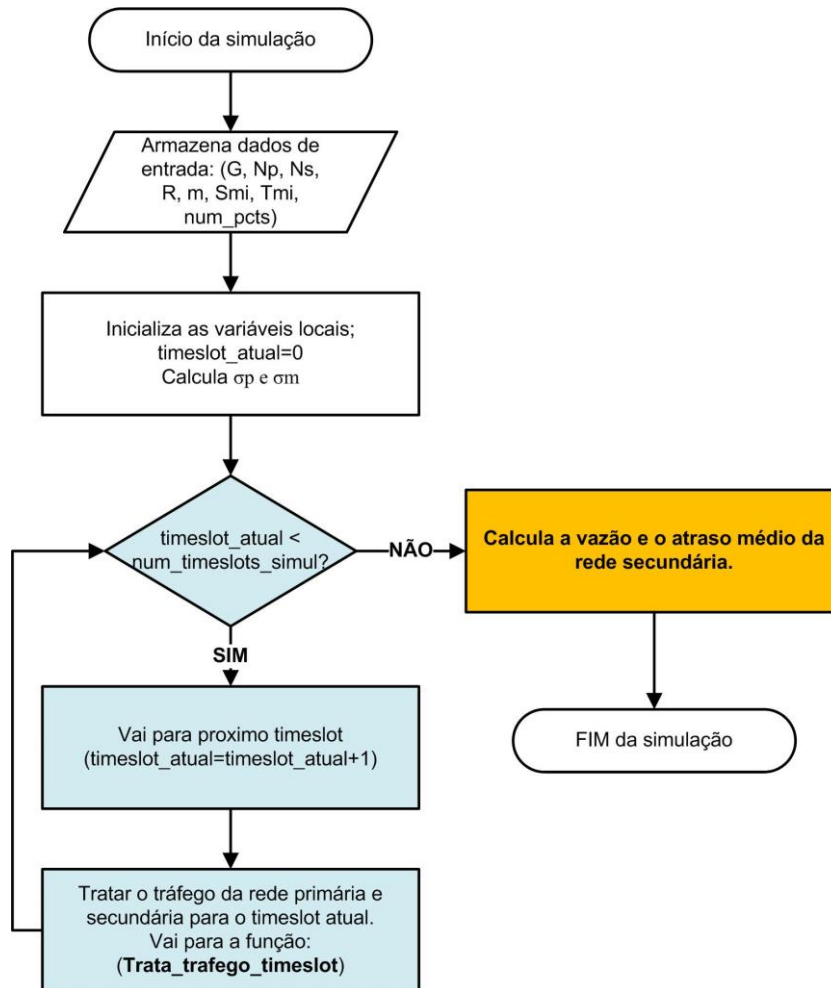


Figura I.1 – Diagrama de fluxo de dados para o laço principal da simulação.

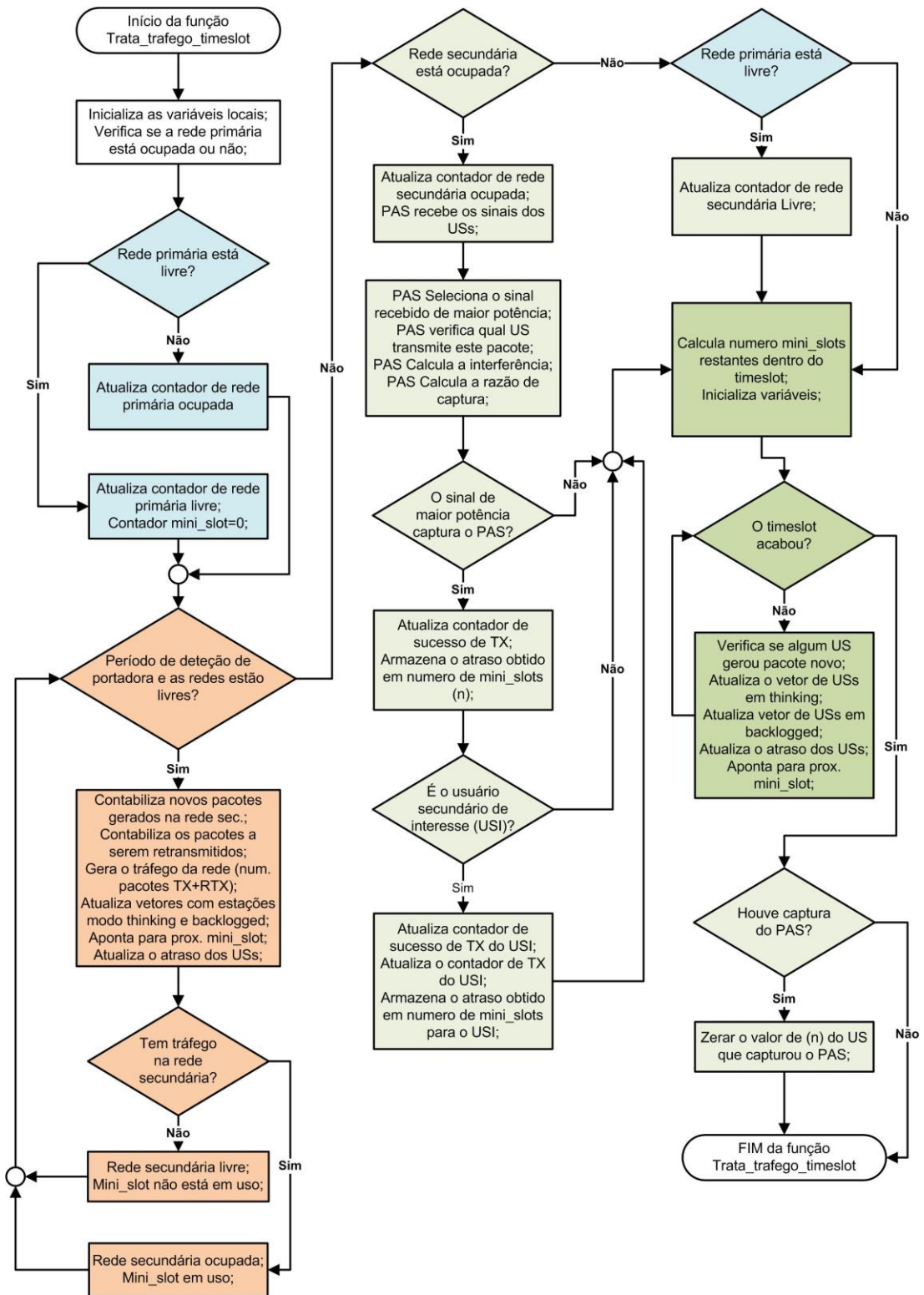


Figura I.2 – Diagrama de fluxo de dados para a função de tratamento de tráfego nas redes.

APÊNDICE II – PROGRAMA FONTE PARA A SIMULAÇÃO PARA O ATRASO MÉDIO DA REDE SECUNDÁRIA COM PROTOCOLO CSMA

```
function [ Delay_CSMA1 ] = SIM_CSMA2_MS4( index1, G,timeslots, Np,
Ns, R1, m1, Smi, Tmi, user_int)

%SIM_CSMA2_MS3 Simulação por Monte Carlo para determinação do atraso
médio
% da rede secundaria com protocolo Slotted CSMA,
% Idealizado por Prof. Dr. J. M. C. Brito e A. J. de Faria
% em dezembro de 2013

% RETORNO
% Delay_CSMA1: Valor do atraso médio em número de mini-slots

% Parametros de ENTRADA
% index1: número sequencial da simulação;
% G : carga da rede primária
% timeslots: total de timeslots que será executada a simulação
% Np: número de UPs
% Ns: número de USs
% R1: razão de captura
% m1: razão entre sigma_mi e sigma_p
% Smi: número de mini-slots reservados para detecção portadora
% Tmi: duração do pacote em mini-slots
% user_int: usuário secundário que TX o pacote de interesse

%PARAMETRIZAÇÃO
clc;

med_exp1=1; %valor médio da distribuição exponencial- Rayleigh

index1=index1+1;
%Calc. probabilidade de geração/retransmissão rede primaria
sigma_p=G/Np
%Calc. prob. geração de novo pacote ou "escuta" do canal
sigma_mi=m1*sigma_p
umil=Tmi/(Tmi+Smi); %Fator de utilização do time slot

%Inicialização de variáveis

npactx_total=0;           %num. pacotes gerados nas redes no total
timeslot1=1              %variável de incremento do timeslot de
análise
Count_TSI1=0;           %conta TS IDLE da rede primária
Count_TSB1=0;           %conta TS BUSY na rede primária
Count_TSI2=0;           %conta TS IDLE não usuados por nenhum US
Count_TSB2=0;           %conta TS IDLE usados por US

Conta_pacRTX2=0;        %conta pacotes retransmitidos na rede sec. (k>1)
```

```

Count_suc2=0;      %conta pacotes transmitidos com sucesso na rede
sec
Count_n2=0;        %acumula os valores de k dos pacotes TX SUC pelos
USs
Count_pac2=0;      %conta o número de pcts gerados na rede secundária
Count_pac1=0;      %Conta o número de pcts gerados na rede primária

%armazena n de um US; n é num. MS que o US está tentando TX/RTX.
vnms2=zeros(1,Ns);

mn2=[];
%cada elemento da matriz possui o valor de n conseguido qdo um pac
de
% US é TX com sucesso
mtx=zeros(1,Np);   %vetor com elementos iguais a 1(TX) ou 0 (não
TX)
mrand2=zeros(1,Np); %matriz com elementos unif.dist. entre 0 e 1.

pn0=0;             %Contador para TX com sucesso quando n=0

remain_ms2=0;
n2=0;
isIdle1=0;
isIdle2=0;
hs2=0;            %maior potência de sinal recebido pelo PAS em um time-
slot
est_hs2=0;       %Estacao que TX o pacote com maior potência de sinal
isN0=0;
isCAP2=0;        %PAS foi capturado? (1=Sim)
ind1=1;

msigrx2=zeros(1,Ns); %Vetor com elementos contendo os níveis de
% sinais recebidos

mUSint=[0 0 0 0];   %vetor com estatísticas do usuário de
interesse
% 1- num. pacts capturados com sucesso
% 2- num pacotes capturados com n=0
% 3- somatório de n para pacotes capturados
% 4- num. pacts TX/RTX pelo US de interesse

vthink2=zeros(1,Ns); %USs in thinking state
vbacklog2=zeros(1,Ns); %USs in backlogged state
vrand2=zeros(1,Ns);  %vetor com elementos gerados aleatoriamente
% entre 0 e 1 (uniforme)
vcomp2=zeros(1,Ns);
vrtx2=zeros(1,Ns);   %vetor com USs que vão RTX num dado slot
vtx2=zeros(1,Ns);   %vetor com USs que vão TX num dado slot
vtraffic2=zeros(1,Ns); %tráfego da rede sec. num dado slot

maxn2=timeslots*100;
vn2=zeros(1,maxn2);

G
Np
Ns
Smi
Tmi

```

```

% garantir aleatoriedade no início pseudo-random - sugerido por
% Mathworks
defaultStream = RandStream.getDefaultStream;
savedState = defaultStream.State;
vrand2=rand(1,Ns);

disp('Aguarde Monte Carlo');

%Início: loop executa por (time slots) vezes

while (timeslot1<=timeslots)

    flag_ts=1;
    flag_ms=0;
    s2=0;
    t2=0;

    vtraffic2=zeros(1,Ns);
    vcomp2=zeros(1,Ns);

    %Testa time slot da rede primária - Slotted Aloha

    mgerp=rand(1,Np);
    mtxp=(sigma_p>=mgerp);
    isIdle1=sum(mtxp);
    %se isIdle1=0, time_slot livre, oportunidade, se (i), i=no. UPs em
    TX;

    if (isIdle1==0)
        flag_ts=0;
    end
    Count_TSB1=Count_TSB1+flag_ts;
    Count_TSI1=Count_TSI1+(1-flag_ts);

    %vbacklog2 é um vetor com elemento=1 para estações que possuem
    pacote
    %no buffer.
    vthink2=(0==vnms2)-vtx2;
    vbacklog2=(0<vnms2)+vtx2;
    vbacklogo=vbacklog2;
    vbacklogn=vbacklog2;

    while (s2<(Smi+1) && flag_ts==0)

        vtraffic2=zeros(1,Ns);
        vbacklogo=vbacklogn;
        vrand2=rand(1,Ns);
        vcomp2=(sigma_mi>=vrand2);
        vtx2=vthink2.*vcomp2;
        vthink2=vthink2-vtx2;
        vbacklogn=vbacklogn+vtx2;
        %Tráfego de retransmissão

        vrtx2=vbacklog2.*vcomp2; %vbacklog2 antes
        vtraffic2=vtx2+vrtx2;

```



```

isCAP2=0;
interf2=(sum(msigrx2)-hs2);
SIR2=0;
if (interf2>0)
    SIR2=hs2/interf2; %hs2 é o sinal mais alto na rede sec.
e
                                %interf2 é a soma dos outros sinais
interferentes

    if (SIR2>R1) %R1 é a razão de captura
        isCAP2=1;
    end
else %se houver um usuário apenas, ele é considerado
capturado.
    if (hs2>0)
        isCAP2=1;
        %isCAP2=1, indica que sinal +forte foi capturado
    end
end
if (isCAP2==1)
    %isCAP2=1;
    Count_suc2=Count_suc2+1;
    %contador de pacotes capturados é incrementado de 1
    n2=vnms2(1,est_hs2);
    %verifica em qual n (ms) a estação est_hs2 conseguiu
sucesso
    Count_n2=Count_n2+n2;
    %atualiza o índice da matriz que armazena n quando
    %um US é capturado

    %o vetor mn2 armazena n de cada TX com sucesso de cada
US
    mn2(1,ind1)=n2;
    ind1=ind1+1;

    if n2==0
        pn0=pn0+1;
        %atualiza contador de pacotes capturados com n=0.
        isN0=1;
    else
        vn2(n2)=vn2(n2)+1;
        %conta+1 para cada valor de n2 TX com sucesso
    end

end
vnms2=vnms2+vtx2;
%soma vtx2, pois se a estação está transmitindo ou não foi
capturada,
%ela não pode gerar pacote nos mini-slots do time slot atual.
if (est_hs2==user_int)
    mUSint(1,1)=mUSint(1,1)+isCAP2;
    mUSint(1,2)=mUSint(1,2)+isN0;
    mUSint(1,3)=mUSint(1,3)+(n2*isCAP2);
    mUSint(1,4)=mUSint(1,4)+1;

```

```

        end

    end

    remain_ms2=Tmi+(Smi-s2);
    vtx2o=vtx2;
    vtx2=zeros(1,Ns);
    vbacklog2=(0<vnms2);
    vthink2=(0==vnms2);
    vbacklogd=vbacklog2;
    vbackloga=vbacklog2;

    %Se um time slot esta ocupado, o US em modo thinking pode gerar
    pacote

    while (t2<remain_ms2)
        vbackloga=vbacklogd;
        vrand2=rand(1,Ns);
        vcomp2=(sigma_mi>=vrand2);
        vtx2=vthink2.*vcomp2;
        vthink2=vthink2-vtx2;
        vbacklogd=vbacklogd+vtx2;
        vnms2=vnms2+vbackloga;
        t2=t2+1;

    end

    if (isCAP2==1)
        vnms2=vnms2-vtx2o;
        vnms2(1, est_hs2)=0;
        vnms2;
    end

    timeslot1=timeslot1+1;
    %incrementa o time slot da rede primária
end
mn2;

%calcula media estatistica
vn2;
totsuc2=sum(vn2)
ppn2=vn2./Count_suc2;
sumpn=sum(ppn2)
[tam2 tam1]=size(vn2);
sum10=0;
lim1=750;
for (n3=1:lim1)
    sum10=sum10+(n3*ppn2(n3));
end
D1=sum10;    %Calculo do delay da rede secundaria
sum11=0;

Count_TSB1
Count_TSI1
Count_TSB2

```

