Dissertação de Mestrado

Inatel

Análise de Desempenho de Técnicas de Múltiplo Acesso em Redes de Rádios Cognitivos com Sensoriamento Imperfeito

Pedro Ivo de Almeida Guimarães

Dezembro/2016

Análise de Desempenho de Técnicas de Múltiplo Acesso em Redes de Rádios Cognitivos com Sensoriamento Imperfeito

Pedro Ivo de Almeida Guimarães

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 2016.

Guimarães, Pedro Ivo de Almeida
G963a
Análise de desempenho de técnicas de múltiplo acesso em redes de rádios cognitivos com sensoriamento imperfeito. / Pedro Ivo de Almeida Guimarães. – Santa Rita do Sapucaí, 2016.
127 p.

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

Inclui bibliografia.

1. Rádio cognitivo 2. Múltiplo acesso 3. Análise de desempenho 4. Sensoriamento imperfeito 5. Mestrado em Telecomunicações. I. Brito, José Marcos Câmara. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

Biblioteca "Ministro Octavio Bilac Muniz"

“Bem aventurados os que perseveram. Ouvistes da paciência de Jó, e vistes o fim que o senhor lhe atribuiu”.

S.Tiago 5:1

Dedicatória

Aos meus Pais e irmãos que me ensinaram o caminho da verdade com o objetivo de me tornar uma pessoa capacitada e responsável.

AGRADECIMENTO

Primeiro quero agradecer a Deus pela sua graça abundante na minha vida.

Agradeço ao meu orientador José Marcos Câmara Brito que sempre foi muito paciente, usando métodos para que eu pudesse aprender. Obrigado pelos conselhos, ensinamentos, confiança e valiosa orientação.

Agradecimento especial ao Ministério das Telecomunicações de Angola em especial a Sua excelência o Senhor José Carvalho da Rocha Ministro das Telecomunicações e Tecnologia de Informação, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Instituto Nacional de Telecomunicações-Inatel, Brazil e ao Centro de Referência de Rádio comunicação-CRR, Projeto do Inatel, pelo apoio neste trabalho.

Aos Senhores e Senhoras, Egas Moniz, Luiz Guimarães, Nvunda Assis, Marisa Assis, Elisa da Silva e Indira Marília pelo apoio prestado. Aos Professores Dr. Antônio Marcos Alberti, Dr. Rausley A. A. de Souza, Dr. Dayan A. Guimarães, Dr. Carlos Roberto dos Santos e Dr. Geraldo Gil pelas aulas brilhantes, conselhos, e por mostrarem o caminho e a evolução das nossas pesquisas no INATEL.

Agradeço aos meus amigos e colegas do Mestrado, Monique Carleti, Helvécio Henrique, Ramón O. Mayor, Moises Bandiri, Ricardo Augusto da Silva Junior, Amilcar Feliciano, Branislav Coseiro, Natacha de Carvalho, Elieth Cardoso, Sheila Cassia, Erica Santos, Mauro Cruz, Elvira Diogo.

Agradeço de forma especial a minha namorada Indira Marilia pelo apoio na finalização deste trabalho.

Sumário

Capítulo 1: Introdução 1
1.1. Contextualização 1
1.2. Estrutura e contribuições da dissertação 5
1.3. Publicações 6
Capítulo 2: Fundamentação teórica 7
2.1 Introdução 7
2.2. Análise da propagação do sinal em canal sem fio 7
2.3. Desvanecimento Rayleigh 9
2.4. Ruído e interferência em sistemas de comunicação 10
2.4.1 Relação sinal-ruído 10
2.4.2 Relação sinal-interferência 11
2.5 Efeito de captura 11
2.6 Taxa média de erros de pacotes 12
2.7 Principio básico do sensoriamento espectral em rádios cognitivos 14
2.7.1 Um Teste de Hipóteses Binário 15
2.7.2 Análise do Desempenho do Sensoriamento 15
2.8 Protocolos de múltiplo acesso 17
2.8.1 Classificação dos protocolos de múltiplo acesso 18
2.8.2 Análise dos protocolos MAC 20
2.8.3 Métricas de desempenho dos protocolos MAC 22
2.8.4 Protocolo Slotted Aloha e CSMA 23
2.8.5 Protocolo Slotted Aloha 23
2.8.6 Protocolos CSMA 23
Capítulo 3: Análise do desempenho de redes de rádio cognitivo com sensoriamento perfeito e imperfeito usando Slotted Aloha 25
3.1 Introdução 25

3.2 Modelo original do sistema 26
3.2.1 Arquitetura do modelo original 26
3.2.2 Modelo de tráfego para a rede primária e secundária 27
3.2.3 Desvanecimento no canal 29
3.2.4 Efeito de captura e probabilidade de captura 30
3.2.5 Cálculo da relação sinal interferência nas redes primária e secundária 32
3.2.6 Taxa média de erro de pacotes 34
3.2.7 Cálculo da vazão para o modelo original 35
3.2.8 Cálculo do atraso médio para o modelo original 37
3.3 Novo modelo do sistema 39
3.3.1 Desvanecimento do novo sistema 39
3.3.2 Efeito de captura e probabilidade de captura do novo modelo 40
3.3.3 Cálculo da relação sinal interferência do novo modelo 44
3.3.4 Vazão total do novo modelo 45
3.3.5 Atraso médio do novo modelo 47
3.4 Análises e resultados 48
3.5 Conclusão 72
Capítulo: 4 – Análises de desempenho em redes de rádio cognitivo com sensoriamento perfeito e imperfeito usando Slotted Aloha e CSMA 73
4.1 Introdução 73
4.2 Modelo original 74
4.2.1 Modelo de tráfego para a rede primária 75
4.3 Análise de desempenho da rede primária para o modelo original 76
4.3.1 Análise do desvanecimento na rede primária 76
4.3.2 Efeito de captura e probabilidade de captura na rede primária 76
4.3.3 Cálculo da relação sinal - interferência da rede primária 77
4.3.4 Taxa média de erro de pacote 78
4.3.5 Cálculo da vazão da rede primaria do modelo original 79
4.4 Análise de desempenho da rede secundária para o modelo original 80
4.4.1 Estrutura de mini- slots 80

4.4.2 Modelo de tráfego para a rede secundaria para o modelo original 81
4.4.3 Modelo de desvanecimento da rede secundária para o modelo original 83
4.4.4 Efeito de captura na rede secundária 83
4.4.5 Cálculo da relação sinal-interferência na rede secundária 85
4.4.6 Taxa média de erros de pacotes 85
4.4.7 Cálculo da vazão da rede secundária para o modelo original 86
4.5 Cálculo da vazão global para o modelo original 91
4.6 Novo modelo do sistema 91
4.7 Sensoriamento do canal do novo modelo 91
4.8 Análise de desempenho da rede primária para o modelo novo 94
4.8.1 Probabilidade de o usuário secundário tentar transmitir em um time slot ocupado pelo usuário primário 94
4.8.2 Probabilidade de captura na rede primária no novo modelo 98
4.8.3 Taxa média de erros de pacotes 99
4.8.4 Cálculo da vazão da rede primária do novo modelo 99
4.9 Análise de desempenho da rede secundária no novo modelo 100
4.9.1 Probabilidade de o usuário secundário tentar transmitir em um time slot livre pelo usuário primário 101
4.9.2 Probabilidade de captura na rede secundária no novo modelo 104
4.9.3 Taxa média de erros de pacotes 105
4.9.4 Cálculo da vazão da rede secundária para o novo modelo 105
4.10 Cálculo da vazão global para novo modelo 106
4.11 Resultados numéricos 106
4.12 Conclusão 120
Capítulo 5: Conclusões finais e estudos futuros 121
5.1 Propostas de trabalhos futuros 122
6 Referências Bibliográficas 123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: *Arquitetura de uma rede de rádios cognitivos*.....3
Figura 2.1: *Propagação multipercurso*.....8
Figura 2.2: *Exemplo de funções densidades de probabilidade condicionais de T*.... 16
Figura 3.1: *Arquitetura para o modelo original do sistema*.....27
Figura 3.2: *Modelo de tráfego para o protocolo Slotted Aloha*..... 28
Figura 3.3: *Vazão rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3 dB, m=1, γ_1=10)*..... 50
Figura 3.4: *Vazão rede Primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3 dB, m=1 e P_d=0.9)*.....51
Figura 3.5: *Vazão rede Primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, m=1 e P_d=0.9)*.....52
Figura 3.6: *Vazão rede Primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, γ_1=10 e P_d=0.9)*.....53
Figura 3.7: *Vazão rede Primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=30, γ_0=5, R=3dB, γ_1=10 m=1e P_d=0.9)* 53
Figura 3.8: *Vazão rede Secundária: comparação entre os modelos novo e original N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB,m=1e γ_1=10)* 54
Figura 3.9: *Vazão rede Secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, m=1 e P_d=0.9)* 55
Figura 3.10: *Vazão rede Secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, m=1 e P_d=0.9)* 56
Figura 3.11: *Vazão rede Secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, γ_1=10 e P_d=0.9)*.....57
Figura 3.12: *Vazão rede Secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=30, γ_0=5, R=3dB, γ_1=10 m=1e P_d=0.9)*.....58
Figura 3.13: *Vazão rede Global: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, m=1e γ_1=10)* 59
Figura 3.14: *Vazão rede Global: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10,R=3dB, m=1 e P_d=0.9)*.....60
Figura 3.15: *Vazão rede Global: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, m=1 e P_d=0.9)*.....61

Figura 3.16: *Atraso médio rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB,m=1e γ_1=1*..... 64
Figura 3.17: *Atraso médio rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10,R=3dB, m=1 e P_d=0.9)*..... 65
Figura 3.18: *Atraso médio rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, m=1 e P_d=0.9)*..... 66
Figura 3.19: *Atraso médio rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, γ_1=10 e P_d=0.9)*..... 67
Figura 3.20: *Atraso médio rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, m=1e γ_1=10)*..... 68
Figura 3.21: *Atraso médio rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10,R=3dB, m=1 e P_d=0.9)*..... 69
Figura 3.22: *Atraso médio rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, m=1 e P_d=0.9)*..... 70
Figura 3.23: *Atraso médio rede secundária: comparação entre os modelos novo e original N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, γ_1=10 e P_d=0.9)*..... 70
Figura 4.1: *Arquitetura das redes para o modelo original e o proposto*.....74
Figura 4.2: *Estrutura de time slot para o modelo original*..... 75
Figura 4.3: *Estrutura de time slot da rede primária e de mini-slots da rede secundária*.....80
Figura 4.4: *Modelo de tráfego para a rede secundária com Slotted CSMA*.....82
Figura 4.5: *Estudo de casos de uso e detecção de mini-slots livres na rede secundária*.....89
Figura 4.6: *Probabilidade de J_s US em tentativa de transmissão em um time slot ocupado pelo UP (N_s=10, S_{mi}=5 e P_{dUS}=0.9)*.....97
Figura 4.7: *Probabilidade de J_s US em tentativa de transmissão em um time slot livre da presença do UP (N_s=10, S_{mi} =5, σ_{mi}=0.1 e P_{dUS}=0.9)*..... 102
Figura 4.8: *Probabilidade de J_s US em tentativa de transmissão em um time slot livre da presença do UP (N_s=10, S_{mi}=5, P_{fUS}=0.1 e σ_{mi}=0.1)*..... 102
Figura 4.9: *Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB e P_{dUS}=0.9)*..... 107
Figura 4.10: *Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB e P_{dUS}=0.9)*..... 108

Figura 4.11: *Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=10, γ_1=10, R=3dB, e P_{dUS} =P_{dPAS} =0.9)*..... 109

Figura 4.12: *Vazão da rede secundária comparação entre os novos modelos propostos nos capítulos 3 e 4*..... 110

Figura 4.13: . *Vazão da rede secundária comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dPAS}= P_{dUS}=0.9 P_{fUS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*..... 111

Figura 4.14: *Vazão da rede secundária comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dPAS}= P_{dUS}=0.9, P_{fPAS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*..... 112

Figura 4.15: *Vazão da rede secundária comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dPAS}=0.9 , P_{fPAS}=P_{fUS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*..... 113

Figura 4.16: *Vazão da rede secundária comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dUS}=0.9 , P_{fPAS}=P_{fUS}=0.1,S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*..... 114

Figura 4.17: *Vazão da rede secundária comparação entre os modelos novo e original (N_p=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dPAS}= P_{dUS}=0.9, P_{fPAS}=P_{fUS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10*..... 115

Figura 4.18: *Vazão da rede secundária comparação entre os novos modelos propostos nos capítulos 3 e 4*..... 116

Figura 4.19: *Vazão da rede secundária comparação entre os novos modelos propostos nos capítulos 3 e 4*..... 117

Figura 4.20: *Vazão da rede Global comparação entre os modelos novo e original (N_s=N_p=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dUS}=0.9 , P_{fPAS}=P_{fUS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*..... 117

Figura 4.21: *Vazão da rede Global comparação entre os modelos novo e original (N_s=N_p=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dUS}=0.9 , P_{fPAS}=P_{fUS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*..... 118

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1:	*Valores de w_0 para modulação BPSK Coerente*.....	34
Tabela 3.2:	*resultados sumarizados em termos da vazão*.....	62
Tabela 3.3:	*resultados sumarizados em termos de atraso médio*.....	71
Tabela 4.1:	*Valores do limitantes inferior e superior dos mini slots no período de detecção da portadora considerando análise na rede primária*.....	91
Tabela 4.2:	*Valores dos limitantes inferior e superior dos mini slots no período de detecção da portadora considerando análise na rede secundária*.....	97
Tabela 4.3:	*resultados sumarizados em termos da vazão*.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWGN	*Additive White Gaussian Noise*
BER	*Bit Error Rate*
BPSK	*Binary Phase Shift Keying*
CDMA	*Code Division Multiple Access*
CF	*Centro de Fusão*
C-MAC	*Cognitive- Medium Access Control*
CRN	*Cognitive Radio Network*
CR	*Cognitive Radio*
CSA	*Concurrent Spectrum Access*
CSMA	*Carrier Sense Multiple Access*
DCA-MAC	*Dynamic Channel Assignment - MAC*
DOSS	*Dynamic Open Spectrum Sharing*
DAS	*Dynamic Spectrum Allocation*
FCC	*Federal Communications Commission*
FDP	*Função Densidade de Probabilidade*
FDMA	*Frequency-Division Multiple Access*
ICN	*Internacional Conference on Networks*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
ISNCC	*Internacional Symposium on Netwoks Computers and Communications*
QoS	*Quality of Service*
HC-MAC	*Hardware-constrained Cognitive - MAC*

MAC	*Medium Access Control*
OS-MAC	*Opportunistic Spectrum MAC*
OSA	*Opportunistic Spectrum Access*
PAP	*Ponto de Acesso Primário*
PAS	*Ponto de Acesso Secundário*
PER	*Packet Error Rate*
POMDP	*Partially Observed Markov Process*
PSR	*Packet Success Rate*
RF	*Rádio Frequência*
SER	*Symbol Error Rate*
SINR	*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*
SIR	*Signal-to-Interference Ratio*
SNR	*Signal-to-Noise Ratio*
SPTF	*Spectrum Policy Task Force*
SRAC-MAC	*Single-Radio Adaptive Channel MAC*
SYN-MAC	*Synchronized MAC*
TDMA	*Time Division Multiple Access*
UP	*Usuario Primário*
US	*Usuario Secundário*

LISTA DE SÍMBOLOS

D_{np}	Atraso médio de acesso normalizado em termos de *time-slots* para a rede primária, segundo o novo modelo.
D_{ns}	Atraso médio de acesso normalizado em termos de *time-slots* para a rede secundária, 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.
Ep	Evento onde apenas o usuário primário captura o seu ponto de acesso (PAP).
Es	Evento onde apenas o usuário secundário captura seu ponto de acesso (PAS).
G_p	Carga na rede primária.
I_p	Número de usuários primários que estão tentando transmitir em um dado *time slot* ou número de estações primárias interferentes.
J_s	Número de usuários secundários em tentativa de transmissão em dado *time slot* ou o número de usuários interferentes.
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 *buffer* para os usuários primários e secundários, respectivamente.
N_p	Número total de usuários da rede primária.
N_s	Número total de estações da rede secundária.
$P(itx)$	Probabilidade de *i* usuários primários em tentativa de transmissão em um dado *time slot.*
$P(jtx)$	Probabilidade de *j* usuários secundários em tentativa de transmissão em um dado *time slot.*
$P_{ave}(\Delta)$	Valor da taxa média de erros de pacotes (PER).
P_d	Probabilidade de detectar o canal ocupado quando de fato está ocupado
P_{dPAS}	Probabilidade pelo PAS detectar o canal ocupado no inicio de um *time slot* (P_d).
P_{dUS}	Probabilidade do um US detectar o canal ocupado em um *mini slot* dentro do período de detecção da portadora (P_d).
P_{fPAS}	Probabilidade pelo PAS detectar o falso alarme no inicio de um *time slot,* decide pelo canal ocupado quando na verdade esta livre.
P_{fUS}	Probabilidade do US detectar o falso alarme em um *mini slot* dentro do período de detecção da portadora, decide pelo canal ocupado quando na verdade esta livre.
P_{ip}	Potência média interferente total na rede primária.

P_{is}	Potência média interferente total na rede secundária
$P_{pcap->PAP}$	Probabilidade de que o sinal de interesse do usuário primário capture o ponto de acesso da rede primária.
$P_{scap->PAS}$	Probabilidade de que o sinal de interesse do usuário secundário *capture* o ponto de acesso da rede secundária.
$PSR(\Delta)$	Valor médio da taxa de sucesso de transmissão de pacotes em função do valor médio da SIR (Δ).
$p_x(x_p)$	Função de densidade de probabilidade da potência instantânea $x_{p,}$ do sinal de interesse de um usuário da rede primária.
$p_x(x_s)$	Função de densidade de probabilidade da potência instantânea, *xs*, do sinal de interesse de um usuário da rede secundária.
$p_{yi}(y_i)$	Função de densidade de probabilidade da potência instantânea, *yi*, do sinal interferente de um usuário primário.
$p_{zj}(z_j)$	Função de densidade de probabilidade da potência instantânea, *zj*, do sinal interferente de um usuário secundário.
R	Razão de captura.
S_{mi}	Corresponde ao período de tempo que os USs usam para a detecção da portadora no canal.
V_{np}	Vazão da rede primária segundo o novo modelo.
V_{ns}	Vazão da rede secundária de acordo com o novo modelo.
V_{nt}	Vazão da rede global do novo modelo.
V_{op}	Vazão da rede primária, segundo o modelo original.
V_{os}	Vazão da rede secundária, segundo modelo original.
V_{ot}	Vazão da rede global, segundo o modelo original.
T_{mi}	*Mini slots* usados pelos USs para transmissão de pacotes de dados.
U_{mi}	Fator de utilização de um *time slot* pelos usuários secundários, considerando que alguns *mini-slots* são reservados para *escutar* o meio.
w_0	Valor constante e igual ao resultado da integração de *f(x).*
x_p	Valor instantâneo de uma potência do sinal de interesse recebido na rede primária.
X_p	Valor médio da potência do sinal de interesse, x_p, da rede primária.
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	Valor médio da potência do sinal de uma estação da rede primária considerada interferente.
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 instantâneo recebido do sinal de uma estação interferente secundária.
γ_1	Razão entre a potência média do sinal praticada na rede primária e na rede secundária modelo original.
γ_Φ	Razão entre a potência média do sinal praticada na rede primária e na rede secundária do novo modelo, a variável γ_Φ pode assumir o valor de γ_1, *se o PAS* detectar o canal como ocupado, ou γ_0 se detectar o canal como livre.
Δ	Valor médio da relação sinal-interferência no receptor.
Δ_s	Valor médio da relação sinal-interferência na rede secundária.
Δ_p	Valor médio da relação sinal-interferência na rede primária.
σ_{mi}	Probabilidade de um US gerar pacote novo em um *mini-slot* quando considera-se *o slot CSMA.*
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 *Slotted Aloha.*
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 *Slotted Aloha.*

RESUMO

Rádio cognitivo é um novo paradigma no desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fios que permite o acesso dinâmico ao espectro eletromagnético e é, portanto, forte candidato como solução tecnológica para as redes do futuro. Nesses sistemas, os protocolos de múltiplo acesso têm grande impacto no desempenho das redes, 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 da vazão e atraso médio de acesso, de uma rede de rádios cognitivos que utiliza os protocolos *Slotted Aloha* e (CSMA - *Carrier Sense Multiple Access*). No estudo realizado, os resultados previamente apresentados na literatura, que consideram o impacto no desempenho da rede do efeito de captura e da taxa média de erro de pacote (PER– *Packet Error Rate*), são estendidos para também considerar o sensoriamento imperfeito e diferentes níveis de potência na rede cognitiva.

Palavras chave - Rádio cognitivo, múltiplo acesso, análise de desempenho, sensoriamento imperfeito.

ABSTRACT

Cognitive radio is a new paradigm in the development of wireless communication systems that allows dynamic access to the electromagnetic spectrum and is, therefore, a strong candidate as a technological solution to the networks of the future. In these systems, multiple access protocols have a great impact on network performance, being responsible for organizing access to the media of different types of users and avoid or make the interference become tolerable to the primary users.

Thesis work analyzes performance in terms of throughput and the average delay of access to cognitive radios network using the Slotted Aloha and Carrier Sense Multiple Access (CSMA) protocol. In the realized study, the previously results presented in the literature, that consider the impact on the performance of the capture effect net and the Packet Error Rate (PER), are extended to also consider the imperfect sensing and different power rating levels in the cognitive network.

Keywords - Cognitive radio, multiple access, performance analysis, imperfect sensing.

Capítulo 1: Introdução

1.1. Contextualização

Novos serviços em sistemas de comunicação sem fio cada vez mais necessitam de maiores bandas para suportar a crescente demanda por tráfego. O espectro eletromagnético é um recurso público ilimitado mas que não pode ser aproveitado em toda sua extensão devido a limitações da tecnologia disponível atualmente. As concessões deste recurso 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 faixas de frequências alocadas nesse sistema são usadas parcialmente ou até mesmo não são utilizadas em determinados horários e/ou regiões geográficas, enquanto que outras estão congestionadas [1] - [5].

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

O relatório do (SPTF - *Spectrum PolicyTask Force*), ligado ao (FCC - *Federal Communications Commission*), traz como resultado o fato de que é necessário evoluir as políticas atuais de uso e gerenciamento do espectro em direção a uma outra que reflita o uso dinâmico do espectro [6]. O gerenciamento espectral flexível e dinâmico abre novas oportunidades para que diferentes tecnologias sem fio usem o espectro de frequência de forma eficiente. Este modelo prevê que usuários não licenciados ou Usuários Secundários (US) possam acessar o espectro de maneira dinâmica e oportunista. A restrição para que isso se realize é que o US não deve causar interferência que prejudique as transmissões do Usuário Primário (UP). Satisfeita essa condição, o acesso ao espectro deixa de ser exclusivo do UP e passa a ser compartilhado com o US, porém com prioridade para o UP [1] [2] [7].

A tecnologia de rádio cognitivo (CR- *Cognitive Radio*) é uma forte candidata como solução tecnológica para as chamadas redes sem fio de próxima geração [2] [3].

Em [4], rádio cognitivo é definido como um sistema de comunicação sem fio inteligente capaz de aprender com o ambiente a sua volta e adaptar seus parâmetros de operação em tempo real. As principais funcionalidades de um rádio cognitivo são [2] [7] [8]:

a) Sensoriamento espectral: representa o processo de monitoramento dos sinais de radio frequência (RF) na antena de recepção. Pelos dados do sensoriamento, o usuário cognitivo detecta a presença de transmissores atuando na rede e traça o perfil de ocupação do espectro monitorado. O principal objetivo do sensoriamento para os usuários cognitivos é fornecer subsídios para a identificação das oportunidades de acesso dinâmico ao espectro.

b) Gerenciamento espectral: responsável por definir dentre as bandas de frequências classificadas como livres qual melhor atende aos requisitos de qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) para que seja efetuada a comunicação da rede secundária.

c) Mobilidade espectral: responsável pela migração entre frequências de operação, mantendo os requisitos de comunicação contínua. Função também conhecida como *handoff* espectral.

d) Compartilhamento espectral**:** garante que todos os usuários coexistentes possam acessar as faixas de frequências disponíveis. A função de compartilhamento espectral deve incluir muito das funcionalidades dos protocolos de controle de acesso ao meio (MAC -*Medium Access Control*) [2] [8].

Rede de rádios cognitivos (CRN - *Cognitive Radio Network*) é uma rede capaz de estabelecer as conexões entre os seus nós de rádios cognitivos e ajustar seus parâmetros de conectividade para se adaptar as mudanças no ambiente, topologia, condições de funcionamento e as necessidades dos usuários [4]. 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 1.1 mostra uma arquitetura de CRN. Nesse ambiente, a rede secundária acessa o espectro de frequência para realizar as suas transmissões de dados quando este não é utilizado pelos usuários da rede primária [1] [2].

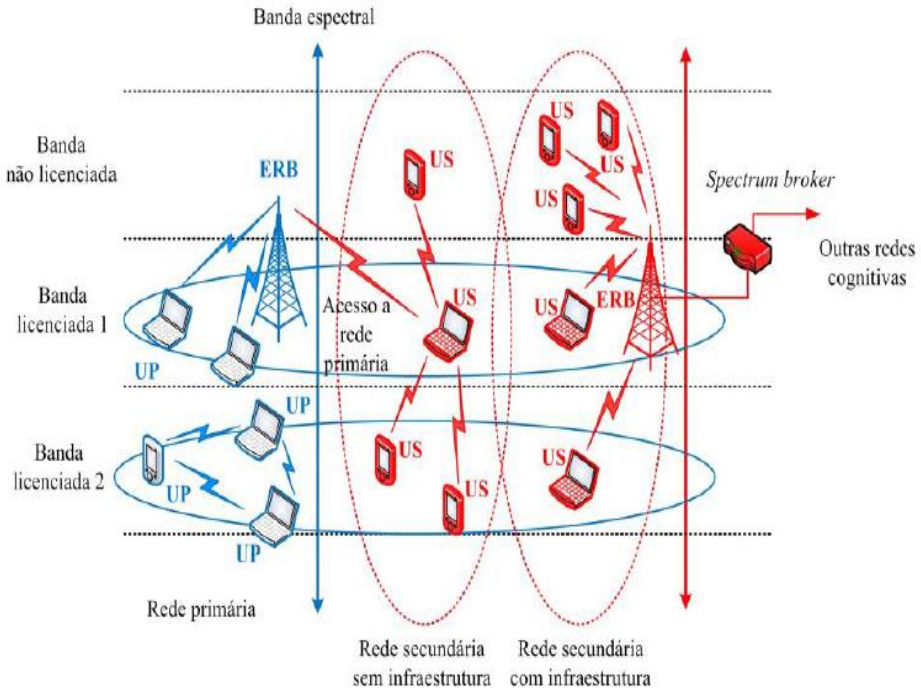


Figura 1.1: *Arquitetura de uma rede de rádios cognitivos.*

A rede primária é a rede já existente e em operação e os seus usuários são licenciados para operar em uma dada banda do espectro e em uma dada região. O UP tem 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 (DSA - *Dynamic Spectrum Access*) [1].

Na rede secundária, USs não têm licença para operar na banda desejada. Desta forma, monitoram o ambiente de rádio e acessam o espectro ocioso temporariamente de maneira oportunista [2]. Por outro lado, nesta condição, se o UP 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 [9] [10].

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 [11]. 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 [12].

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 [13].

Um grande número de estudos sobre protocolos MAC para redes de rádios cognitivos foi realizado em [5] e [11], 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 [11].

1.2. Estrutura e contribuições da dissertação

Em [13] o desempenho das redes primária, secundária e global são analisadas para vários protocolos de acesso ao meio. Na primeira arquitetura analisada, os usuários usam o protocolo *Slotted Aloha* nas redes primária e secundária. Em um segundo caso, considera-se que os usuários da rede primária continuam a usar *Slotted Aloha* e os usuários da rede secundária operam com o protocolo *Slotted* CSMA.

Na análise apresentada em [13] 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 [13] não considera-se a taxa média de erro de pacote (PER), que ocorre devido ás interferências no sistema de comunicação. Na maioria das aplicações de sistemas de comunicações, os pacotes recebidos com erros são descartados e retransmitidos, o que resulta em menor vazão e maior atraso. Esta lacuna nas análises apresentadas em [13] foi resolvida pela extensão apresentada em [14]. Entretanto, as análises apresentadas em [13] e [14] não consideram dois aspectos importantes:

(1) sensoriamento imperfeito na rede secundária: este efeito ocorre devido às instabilidades dos canais de comunicação sem fio, como o desvanecimento e o ruído do canal.

(2) diferentes níveis de potência de transmissão na rede secundária em função da decisão do estado do canal: este efeito ocorre com a premissa de minimizar as interferências na rede primária.

O objetivo principal deste trabalho é estender as análises apresentadas em [13] e [14], considerando os efeitos de sensoriamento imperfeito e diferentes níveis de transmissão na rede secundária.

Assim sendo, neste trabalho propõe-se uma extensão do modelo original apresentado em [14], dando origem a um ***novo modelo***, onde se estuda e analisa o desempenho das redes primária, secundária e global. Como as arquiteturas do modelo original foram analisadas numericamente e validadas por simulações, isso permite comparar os resultados dos cálculos quando o sensoriamento imperfeito é considerado.

Os demais capítulos deste trabalho estão organizados como segue. No Capítulo 2 apresenta-se algumas fundamentações teóricas usadas neste trabalho, abordando as questões referentes à propagação do sinal em um canal sem fio, ruído, interferência, taxa média de erros de pacotes, sensoriamento espectral em rádios cognitivos e, encerrando o capítulo, uma breve descrição dos protocolos de múltiplo acesso usados neste trabalho. No Capítulo 3 é apresentada uma arquitetura de rede que usa protocolo *Slotted Aloha* nas redes primária e secundária. Neste capítulo é investigado o desempenho em termos da vazão e do atraso médio normalizado, considerando o modelo original [14] e um novo modelo, no qual considera-se o sensoriamento imperfeito e diferentes níveis de potência de transmissão. No Capítulo 4 traz-se outra arquitetura de rede, onde utiliza-se na rede primária o protocolo *Slotted Aloha* e na rede secundária o *Slotted* CSMA, novamente o desempenho das redes é analisado para o modelo original e para o novo modelo. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e propostas para futuros trabalhos.

1.3. Publicações

Durante o trabalho de pesquisa foram elaborados e publicados 2 artigos:

a) Pedro Ivo de Almeida Guimarães, e José Marcos Câmara Brito, "Throughput Analysis in Cognitive Radio Networks Using Slotted Aloha Protocol with Imperfect Sensing", publicado no ICN - International Conference on Networks, 21 a 25 de fevereiro de 2016, Lisboa, Portugal;

b) Pedro Ivo de Almeida Guimarães, e José Marcos Câmara Brito, "Average Delay in Cognitive Radio Networks with Imperfect Sensing Using Slotted Aloha Protocol", ISNCC – International Symposium on Networks, Computers and Communications, 11 a 13 de maio de 2016, Hammamet, Tunisia.

Capítulo 2: Fundamentação teórica

2.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar resumidamente os fundamentos teóricos usados neste trabalho: desvanecimento no canal, interferência, efeito de captura, PER, sensoriamento espectral em rádios cognitivos e protocolos MAC.

Os canais de comunicações sem fio representam um desafio para a transmissão de dados de forma confiável e em alta velocidade. A transmissão é susceptível ao ruído, a interferência e ao desvanecimento encontrado no canal [15].

O conhecimento do desvanecimento, ruído e interferência no canal são importantes para se estudar diversos eventos, tais como: (1) o efeito de captura; (2) a taxa média de erros de pacotes e (3) a detecção do espectro em rádios cognitivos. Por sua vez, estes eventos afetam o desempenho, em termos da vazão e atraso médio, das redes analisadas neste trabalho.

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma: na Seção 2.2 é analisada a propagação do sinal em canal sem fio; na Seção 2.3 é abordado o desvanecimento no canal do tipo Rayleigh; em 2.4 é apresentado o ruído e interferência em sistemas de comunicação; em 2.5 é apresentado o efeito de captura; a Seção 2.6 traz uma introdução sobre a PER; a Seção 2.7 apresenta o sensoriamento espectral em rádios cognitivos e, finalmente, em 2.8 os protocolos MAC são brevemente descritos.

2.2. Análise da propagação do sinal em canal sem fio

O desvanecimento em canais de comunicações sem fio terrestres é caracterizado por dois efeitos chamados de desvanecimento de grande escala e de pequena escala [16] [17].

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 [15] [16].

A Figura 2.1 mostra um típico canal com propagação múltiplo percurso. No receptor, 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 de múltiplo percurso é percebido em distâncias relativamente curtas, sendo denominado de desvanecimento de pequena escala [15] [16].

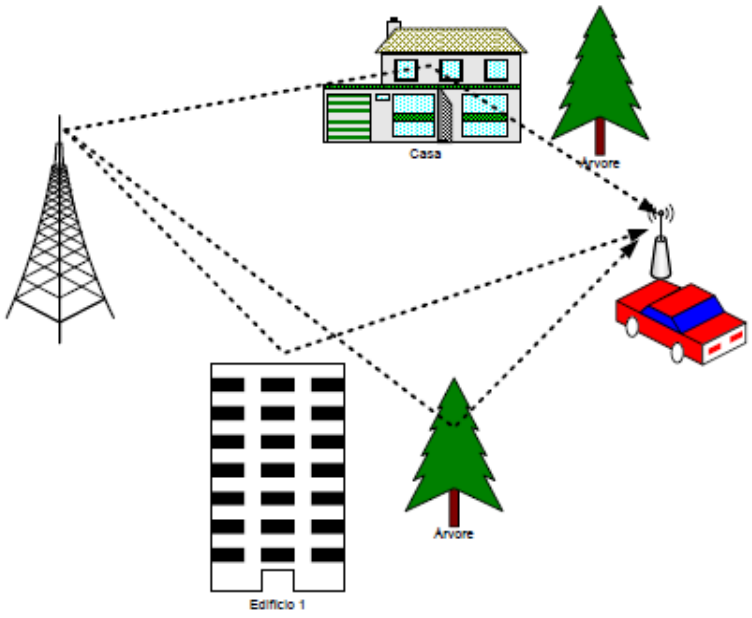


Figura 2. 1: *Propagação Multipercurso*.

A velocidade das flutuações do sinal recebido depende da velocidade relativa entre transmissor e receptor. Embora os canais com múltiplos percursos 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 o desvanecimento é

considerado lento. Caso contrário, o perfil do canal muda antes que o símbolo seja recebido e, neste caso, trata-se de um canal com desvanecimento rápido [17].

.

A amplitude do sinal recebido é uma variável aleatória e geralmente é analisada considerando alguma distribuição de probabilidade conhecida, como Rayleigh, Rice e Nakagami [17] [18].

2.3. Desvanecimento Rayleigh

O desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh ocorre quando existem múltiplos percursos indiretos entre o transmissor e o receptor, não havendo nenhum caminho dominante ou linha de visada entre eles [19].

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 [16]

$$g(t) = g_I(t) + jg_Q(t). \tag{2.1}$$

Onde $g_I(t)$ e $g_Q(t)$ são as componentes em fase e quadratura do envelope complexo recebido. Para alguns ambientes de múltiplo percurso, 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 densidade de probabilidade é representada por [16] [20]:

$$p_R(r) = \begin{cases} \dfrac{2r}{\Omega} e^{-\frac{r^2}{\Omega}}, r \geq 0 \\ 0, \text{ caso contrario} \end{cases}. \tag{2.2}$$

Onde r é a amplitude do envelope recebido e Ω é o segundo momento de r, isto é, $\Omega=\mathrm{E}[r^2]$ [20].

Seja o teorema apresentado por [20]:

$$\begin{aligned} f_Y(y) &= \left.\frac{f_X(x)}{|g'(X)|}\right|_{x=g^{-1}(y)} \\ |g'(X)| &= \left|\frac{dY}{dX}\right|. \end{aligned} \tag{2.3}$$

Onde X e Y são variáveis aleatórias, $f_Y(y)$ e $f_X(x)$ são funções densidades de probabilidade. Em [21], 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 em [16]:

$$P_x(x_p) = \frac{1}{X_p} e^{-x_p / X_p}, \tag{2.4}$$

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 $X_p = \Omega$.

2.4. 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 [20]. Podem ser classificados em categorias, como ruído térmico, intermodulação, *crosstalk* ou impulsivo [19]. Destes, o ruído térmico e o impulsivo são os mais importantes na análise do desempenho de sistemas de comunicação [20].

2.4.1 Relação sinal-ruído

A relação entre sinal e ruído (SNR- *Signal-to-Noise Ratio*) é usada para medir a qualidade do enlace de comunicação. De modo geral, a SNR é definida como [22]:

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruido}}. \tag{2.5}$$

Onde P_{sinal} representa a potência do sinal que transporta a informação e $P_{ruído}$ representa a potência do ruído gaussiano branco aditivo (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*). Na escala em decibel, tem-se [22]:

$$SNR_{dB} = 10\log\frac{P_{sinal}}{P_{ruido}} = P_{sinal}(dB) - P_{ruido}(dB). \tag{2.6}$$

Na presença de sistemas de rádio com interferência, a qualidade do enlace pode ser medida através da relação entre sinal e interferência mais ruído (SINR - *Signal- to-Interference-plus-Noise Ratio*), calculada por [22]:

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruido} + P_{interf}}. \quad (2.7)$$

Onde P_{interf} representa 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 [23].

2.4.2 Relação sinal-interferência

A relação entre sinal e interferência (SIR- *Signal-to-Interference Ratio*) 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 determinado ambiente particular de interferências. Geralmente, estas razões são definidas *a priori* de modo a garantir a qualidade satisfatória do serviço e pode ser calculada por [24]:

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

Onde 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.

2.5 Efeito de captura

Em canais de comunicação sem fio, os sinais dos pacotes que chegam ao receptor possuem níveis de potência diferenciados devido à distância entre os transceptores, nível de potência de transmissão praticada e desvanecimento [25] [26] [27].

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 [28] [29].

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 [28]. 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] [23].

O método mais simples e comum de contabilizar o efeito de captura é baseado no modelo do limiar da razão entre sinal e interferência [26]. 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 dado 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, *Pcap*, pode ser representada como [13] [26]:

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

Onde x_p é a potência do sinal do pacote de interesse, 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 que depende do esquema de modulação, da codificação usada ou não no canal e das características do receptor [26] [28].

2.6 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* (BER-*Bit Error Rate*), taxa média de erro de símbolos (SER – *Symbol Error Rate)* ou pela taxa média de erro de pacote 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 [30]. De acordo com [31], 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. É importante buscar um modelo, preciso e replicável, que permita analisar o desempenho de um sistema no nível de pacote [32].

Em [33] é proposto um cálculo do valor da PER em função da SNR, usando um limitante superior em um canal sem fio 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_{sinal}, em um canal sem fio com desvanecimento lento de Rayleigh e r a amplitude do sinal recebido, que pode ser calculada por [33]:

$$r = \alpha\sqrt{P_{\sin al}}\,\xi + n_0. \tag{2.10}$$

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 o comprimento do pacote, mas varia de maneira independente de um pacote para outro. No receptor, o valor instantâneo da SNR, δ, é dada por [33]:

$$\delta = \frac{\left|\alpha^2\right| P_{\sin al}}{N_0}. \tag{2.11}$$

O valor médio da SNR, Δ, em um canal com ruído AWGN é dado por [33]:

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

Sejam agora uma função $f(\delta)$ que relaciona a PER com a SNR instantânea em um canal AWGN e $g(\delta)$ a função densidade de probabilidade da SNR. Então, a PER média, denotada como $P_{ave}(\Delta)$, pode ser calculada pela integral:

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

Para desvanecimento Rayleigh, δ é exponencialmente distribuída e $g(\delta)$ pode ser representada por [33]:

$$g(\delta) = \frac{1}{\Delta}\mathrm{e}^{-\delta/\Delta}. \tag{2.14}$$

Assim sendo a Eq.(2.13) é dada por [33]:

$$P_{ave}(\Delta) = \frac{1}{\Delta}\int_0^{\infty} f(\delta) e^{-\frac{\delta}{\Delta}} d\delta. \quad (2.15)$$

O cálculo da PER usando a Eq.(2.15) 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. Assim sendo, propôs-se em [33] um método de cálculo da PER usando um limitante superior.

Tem-se que w_0 é um limitante superior não negativo resultado da integração de $f(\delta)$ no intervalo $[0,\infty)$ calculado por [33]:

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

Em [33] a PER do sistema de comunicação, $P_{ave}(\Delta)$, é obtida de forma aproximada por:

$$P_{ave}(\Delta) \leq \frac{1}{\Delta}\int_0^{w_0} e^{-\frac{\delta}{\Delta}} d\delta. \quad (2.17)$$

Resolvendo a integral da Eq.(2.17), tem-se então [33]:

$$P_{ave}(\Delta) \leq \left(1 - e^{-w_0/\Delta}\right). \quad (2.18)$$

2.7 Principio básico do sensoriamento espectral em rádios cognitivos

Em sua missão de utilizar faixas desocupadas do espectro de frequências, o RC tem como uma de suas principais funcionalidades o sensoriamento espectral. Essa tarefa é responsável por obter informações a respeito da ocupação ou não do espectro em uma determinada área geográfica em um dado intervalo de tempo. Como não é possível garantir com certeza absoluta qual o estado do canal, o processo de sensoriamento do espectro leva a uma decisão cujo grau de precisão depende diretamente do cenário em que os rádios se encontram e também das técnicas e estratégias utilizadas.

2.7.1 Um Teste de Hipóteses Binário

O objetivo da detecção espectral é decidir sobre a presença ou ausência de um usuário primário no canal sob análise, esta pode ser modelada como um teste de hipóteses binário cujas possibilidades são as seguintes [34] [35] [36]:

H_1: Presença do sinal primário

H_0: Ausência do sinal primário.

Para tais hipóteses, o sinal captado por um sensor da rede pode ser modelado como:

$$y(t) = \begin{cases} w(t) & |H_0 \\ h(t)s(t) + w(t) & |H_1 \end{cases}. \tag{2.19}$$

Onde $h(t)$ denota o ganho do canal ou atenuação do canal entre o transmissor primário e a antena receptora, $s(t)$ é o sinal transmitido pelo usuário primário e $w(t)$ representa o ruído gaussiano branco aditivo (AWGN- *Additive White Gaussian Noise*). Na ausência de um transmissor primário, o sinal recebido é composto apenas pelo ruído AWGN. Já na presença do UP, o sinal recebido é composto, além do ruído, também pelo sinal do transmissor primário ponderado pelo ganho do canal de comunicação. Por meio do processamento do sinal *y(t)* recebido, cada técnica de sensoriamento calcula um valor denominado variável de decisão ou estatística de teste (T). A variável de decisão é então comparada a um limiar (ʎ) para se estimar se o canal está ocupado ou livre [35] [36].

2.7.2 Análise do Desempenho do Sensoriamento

Devido ao ruído presente no sinal *y(t)* em ambas as hipóteses, este sinal não é determinístico, razão pelo qual T é uma variável aleatória. Como resultado deste teste de hipóteses, quatro eventos são possíveis e cada evento ocorre com uma determinada probabilidade descrita por:

A: Decidir por $\widehat{H_0}$ quando H_0 é a hipótese correta: $Pr = \{\widehat{H_0}|H_0\}$

B: Decidir por $\widehat{H_1}$ quando H_0 é a hipótese correta: $Pr = \{\widehat{H_1}|H_0\}$

C: Decidir por $\widehat{H_1}$ quando H_1 é a hipótese correta: $Pr = \{\widehat{H_1}|H_1\}$

D: Decidir por $\widehat{H_0}$ quando H_1 é a hipótese correta: $Pr = \{\widehat{H_0}|H_1\}$.

Onde $Pr\{.\}$ denota a probabilidade de ocorrência de um determinado evento.

A Figura 2.2 mostra as funções de densidades de probabilidade condicionais de T.

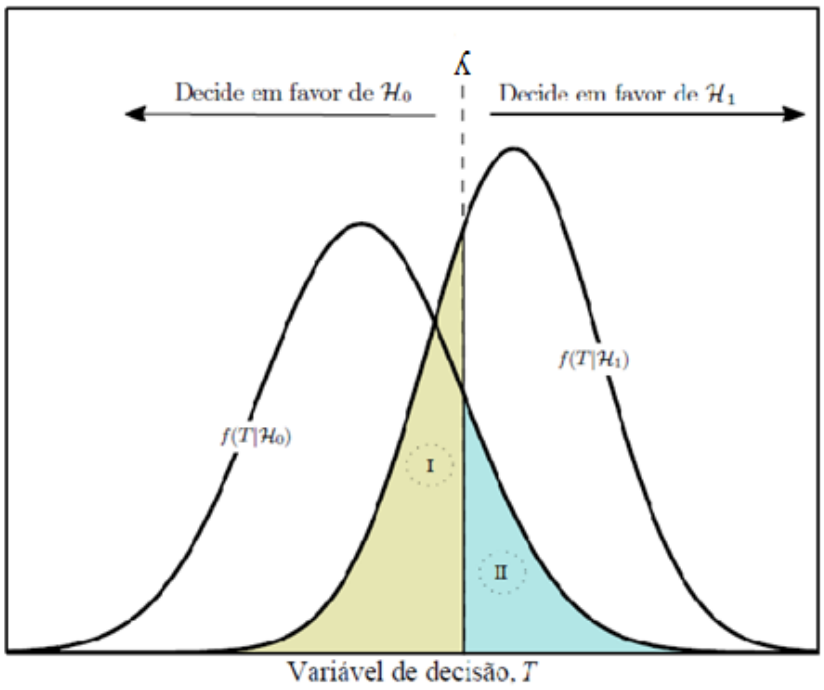


Figura 2.2: *Exemplo de funções densidade de probabilidade condicionais de T.*

No que diz respeito ao sensoriamento espectral, tais eventos e suas probabilidades, representadas pelas regiões sob as curvas de densidade, possuem significado físico e podem ser utilizadas para mensurar o desempenho de uma determinada técnica de sensoriamento. Dessa maneira, tem-se o seguinte [36]:

A) Probabilidade de falso alarme. É a probabilidade de decidir em favor da presença do usuário primário quando, na verdade, o canal está desocupado. É desejável que esta probabilidade seja a menor possível, pois a ocorrência de um evento de falso alarme significa que a rede secundária deixou de aproveitar uma oportunidade em que não havia UP ocupando o espectro. Assim, uma baixa probabilidade de falso alarme garante maior eficiência no aproveitamento de lacunas espectrais. Esta probabilidade compreende a área (II) na Figura 2.2, dada por [36]:

$$P_f = \Pr\left[\hat{H}_1 \middle| H_0\right] = \Pr\left[T > \lambda \middle| H_0\right] = \int_{\lambda}^{\infty} f\left(T \middle| H_0\right) dt. \tag{2.20}$$

B) Probabilidade de se encontrar uma lacuna espectral: é a probabilidade de estimar que determinada faixa de frequência está livre, quando de fato não há usuário primário transmitindo no canal. É desejável que essa probabilidade seja a mais elevada

possível, pois assim a rede secundária aproveita com maior eficiência as oportunidades de transmissão. Esta probabilidade é dada por [36]:

$$1-P_f = \Pr\left[\hat{H}_0 \middle| H_0\right] = \Pr\left[T < \lambda \middle| H_0\right] = \int_{-\infty}^{\lambda} f\left(T \middle| H_0\right) dt. \quad (2.21)$$

C) Probabilidade de detecção correta: é a probabilidade de detectar a presença do UP quando de fato o canal estiver ocupado. Uma probabilidade de detecção correta elevada é necessária para que a rede secundária interfira o mínimo possível nas transmissões da rede primária. Esta probabilidade pode ser calculada por [36]:

$$P_f = \Pr\left[\hat{H}_1 \middle| H_0\right] = \Pr\left[T > \lambda \middle| H_0\right] = \int_{\lambda}^{\infty} f\left(T \middle| H_0\right) dt. \quad (2.22)$$

D) Probabilidade de falso negativo: acontece quando o UP está transmitindo na banda sensoriada e o resultado da detecção aponta o espectro como livre. É desejável que seja a menor possível, pois caracteriza uma situação em que o US pode causar interferência na rede primária por ter detectado o espectro como livre quando na realidade não estava. Esta probabilidade compreende a área (I) na Figura 2.2 e é dada por [36]:

$$1-P_d = \Pr\left[\hat{H}_0 \middle| H_1\right] = \Pr\left[T < \lambda \middle| H_1\right] = \int_{-\infty}^{\lambda} f\left(T \middle| H_1\right) dt. \quad (2.23)$$

Conforme apresentado nas equações (2.20) a (2.23), o limiar de decisão tem influência direta nas probabilidades apresentadas.

A prática mais usual é definir valores mínimo para P_f e máximo para P_d aceitáveis, de acordo com requisitos de QoS. Por exemplo, no protocolo IEEE 802.22, a P_d mínima deve ser de 0,9 e a P_f máxima de 0,1 [35] [37].

No novo modelo apresentado neste trabalho foi adotado o sensoriamento centralizado na rede cognitiva, onde o processo de sensoriamento e a decisão a respeito do canal são definidos em uma central denominada centro de fusão (CF), que pode ser um ponto de acesso secundário (PAS).

2.8 Protocolos de múltiplo acesso

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 [38] [39] [40]. Estes

protocolos são esquemas de alocação de canais que possuem características de desempenho desejáveis [39].

A canalização do meio é uma técnica amplamente adotada nas redes sem fio 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 [38]. Dependendo da política de compartilhamento utilizada, estes subcanais podem ser atribuídos de forma exclusiva aos usuários, ou acessados de forma aleatória ou, ainda, de maneira híbrida [40].

2.8.1 Classificação dos protocolos de múltiplo acesso

Os protocolos de múltiplo acesso são classificados de muitas maneiras na literatura. Em [40], por exemplo, eles são classificados em: (1) protocolos com alocação fixa, (2) 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, TDMA (*Time Division Multiple Access*) e o CDMA – (*Code Division Multiple Access*) [40].

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 [40]. 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 [39] [40].

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 [40], 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 [40].

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* [40].

Uma classificação um pouco diferente da anterior, dedicada a redes sem fio 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 [13] [11] [41] [42] [43] [44].

Os protocolos MAC de acesso aleatório geralmente são baseados no protocolo CSMA [43]. 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 [11] [43]. 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 [13]. 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 [11] [43].

Nos protocolos híbridos há uma combinação de protocolos MAC com acesso aleatório e com janelas temporais [13] [11] [43]. Neste tipo de protocolo, no canal de controle é usado esquema de acesso aleatório e os dados são transmitidos em janelas de tempo [13].

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 [13]. 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 [11]. No padrão IEEE 802.22, por exemplo, é especificado um

protocolo com janelas de tempo para os usuários secundários [13] [35]. Por fim, o DSA *Driven* MAC (DSA - *Dynamic Spectrum Allocation*) é um tipo de protocolo híbrido [11] [13].

Na topologia de rede distribuída, cada nó é responsável por controlar a alocação do espectro e os procedimentos de acesso. De acordo com [11], [13] e [43], 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 [11] e [13] 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 [11] 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 [11] [13].

2.8.2 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 [39].

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 [13] [39].

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 [39] 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 [13]. 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 [39].

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 [13]. 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 [27].

Uma outra questão importante na análise dos protocolos MAC é o canal de retorno, que transporta as informações referentes às atividades anteriores no canal [39]. Nos estudos e análises feitas neste trabalho, assim como ocorre em [45], 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 [39], 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 [39]. 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 [39] 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 [13] 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 [14] [38] [45]. Neste trabalho é adotado um 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 [13], é considerado ainda que todos os usuários podem ser ouvidos pelos membros da rede sem fio em sua área de cobertura.

2.8.3 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 [42]. Em [13], os protocolos de múltiplo acesso usados 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 [42]. De forma semelhante, em [39], 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 [39] [42]. 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 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 [42].

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 [45]. Na instabilidade, a vazão tende a zero e o atraso médio cresce muito [42].

O canal sem fio 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 [42]. O desvanecimento afeta a vazão e o atraso médio e o protocolo usado deve ser confiável mesmo na presença de desvanecimento no canal.

2.8.4 Protocolo Slotted Aloha e CSMA

A seguir são estudados os protocolos de múltiplo acesso *Slotted Aloha* e CSMA, que são os protocolos analisados neste trabalho.

2.8.5 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 [40].

Na situação de canal com tráfego dado pela distribuição de Poisson e número infinito de usuários, a vazão máxima alcançada é de 0,368. No modelo usado em [25] e [42], que considera o efeito de captura na rede que usa o protocolo *Slotted Aloha*, a vazão máxima alcançada é de 0,53. Assim sendo, conclui-se que o efeito de captura aumenta a vazão da rede.

2.8.6 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.

Quando duas ou mais estações começam suas transmissões ao mesmo tempo, resulta em uma colisão, neste caso é necessário realizar uma retransmissão, as estações

participantes geram um atraso aleatório antes de escutarem novamente o meio e tentarem a retransmissão. O retardo de propagação tem um efeito sobre o desempenho do protocolo. Há poucas chances de logo após uma estação começar a transmitir outra estação fique pronta para transmitir e escutar o canal.

Capítulo 3: Análise do desempenho de redes de rádio cognitivo com sensoriamento perfeito e imperfeito usando Slotted Aloha

3.1 Introdução

Neste capítulo estuda-se o desempenho, em termos da vazão e atraso médio, de uma rede de rádios cognitivos em que tanto a rede primária quanto a rede secundária utilizam o protocolo de múltiplo acesso *Slotted Aloha*. Inicialmente analisa-se um modelo previamente proposto na literatura [14], denominado "***modelo original***", em seguida apresenta-se um novo modelo, que considera dois novos aspectos importantes:

1. O sensoriamento imperfeito, que ocorre devido ás instabilidades dos canais de comunicação sem fio.
2. A possibilidade de utilizar diferentes níveis de potência de transmissão na rede secundária, em função da decisão sobre o estado do canal.

Estes efeitos não foram contabilizados no desempenho das redes do modelo original. No novo modelo esses efeitos são contabilizados no cálculo da vazão e atraso médio e os resultados são confrontados com os apresentados em [14].

Neste trabalho considera-se que a rede primária 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. Os UPs têm prioridade na transmissão de seus pacotes de dados. Os USs devem realizar suas transmissões com a premissa de tornar tolerável a interferência sobre as comunicações dos UPs [14]. Neste ambiente de rádio cognitivo, os usuários primários e secundários competem utilizando acesso aleatório ao canal, conforme as regras do protocolo *Slotted Aloha*. Em [46] são apresentados dois modelos de acesso espectral cognitivo: acesso espectral oportunista - (OSA- *Opportunistic Spectrum Access*) e acesso espectral concorrente (CSA- *Concurrent Spectrum Access*). Neste capítulo é usado o modelo CSA, onde o US coexiste com o

UP numa determinada banda de frequência 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. Este modelo é chamado de *spectrum underlay* em [47] ou de compartilhamento espectral em [4].

Nos modelos estudados nesse capítulo emprega-se *Slotted Aloha* como protocolo de acesso ao meio para as redes primária e secundária. O desempenho das redes no modelo original é calculado levando-se em conta o efeito de captura, o desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh e a PER. O novo modelo é uma extensão do modelo original, onde o desempenho da rede é calculado considerando adicionalmente o sensoriamento imperfeito e diferentes níveis de potência de transmissão.

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma: na Seção 3.2 apresenta-se o modelo original para as redes primária e secundária; na Seção 3.3 apresenta-se o novo modelo; a Seção 3.4 apresenta os resultados numéricos obtidos em ambos os modelos e compara o desempenho em termos das redes primária, secundária e global; a Seção 3.5 apresenta as conclusões deste capítulo.

3.2 Modelo original do sistema

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

3.2.1 Arquitetura do modelo original

A Figura 3.1 ilustra a arquitetura usada no modelo original. As redes usam *Slotted Aloha* como protocolo MAC [14][48].

A rede primária possui N_p UPs, sendo que destes, I_p ($0 \leq I_p \leq N_p$) usuários estão tentando transmitir seus pacotes durante um determinado *time slot*. A rede secundária é formada por N_s USs e durante um dado *time slot* há J_s ($0 \leq J_s \leq N_s$) usuários tentando transmitir seus pacotes de dados [13] [14] [48]. No modelo de tráfego para *Slotted*

Aloha, toda vez que um UP ou US gera um novo pacote, ele pode transmiti-lo para seus respectivo ponto de acesso no início do *time slot* seguinte. Se o pacote transmitido não é capturado pelo PAP ou PAS, ele é retransmitido nos *time slots* subsequentes.

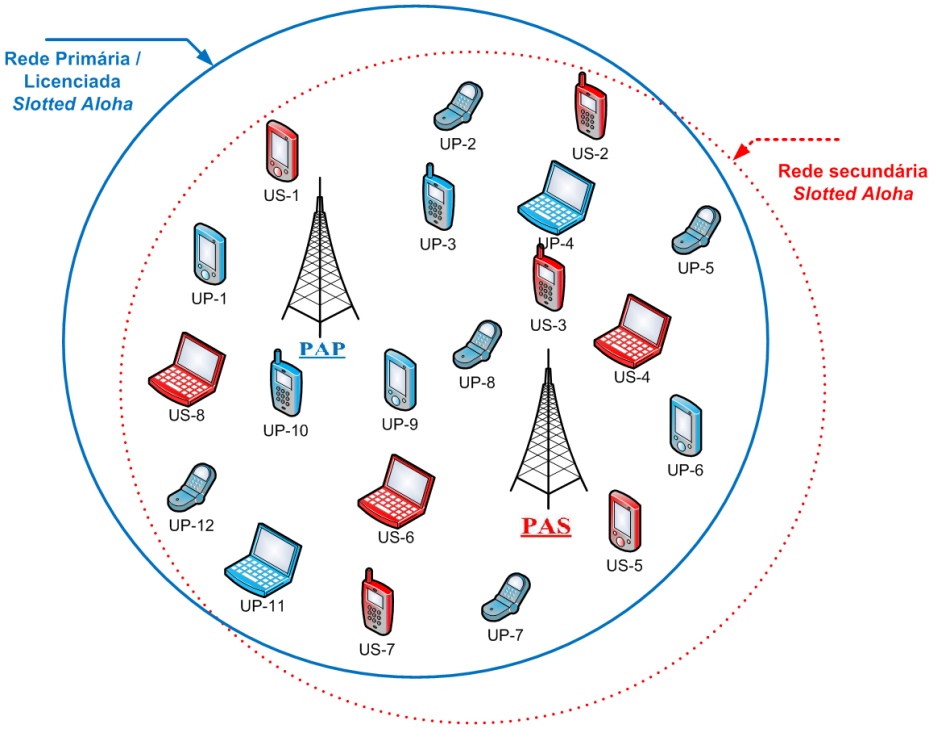


Figura 3.1: *Arquitetura para o modelo original do sistema*.

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 [13] [39].

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 UP ou US pode gerar um novo pacote com probabilidade σ_p ou σ_s,

respectivamente. Assim, a probabilidade de que um usuário não gere um pacote na rede primária é (1-σ_p) e na rede secundária é (1-σ_s). Uma vez que o pacote é gerado, o usuário tenta transmití-lo no início do *time slot* seguinte. Se o pacote é transmitido com sucesso, o usuário volta ao estado *thinking*. Caso contrário, permanece no estado *backlogged*, [39].

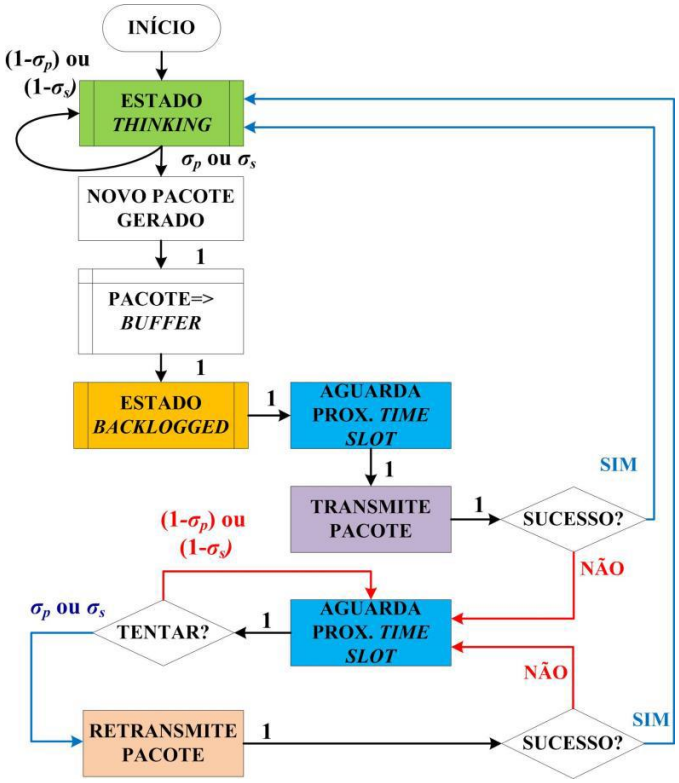


Figura 3.2: *Modelo de tráfego para o protocolo Slotted Aloha.*

Um usuário no estado *backlogged* executa a retransmissão do pacote com parâmetro σ, conforme assumido em [13]. Neste caso, no início de cada *time slot* subsequente à sua entrada neste estado, o UP ou US, poderá retransmiti-lo com probabilidade σ_p ou σ_s, respectivamente, ou não, com probabilidade (1-σ_p) ou (1-σ_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* [39].

Em [14] [48] são consideradas as interferências das redes e efeito de captura no cálculo da vazão e do atraso médio. Assume-se ainda que a chegada dos pacotes ao receptor segue a distribuição de Bernoulli.

3.2.3 Desvanecimento no canal

Considera-se um canal com desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh. Assim, a função densidade de probabilidade da potência recebida é dada por [13]:

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

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

onde x_p e x_s representam as potências instantâneas dos sinais de interesse da rede primária e secundária, respectivamente, e X_p e X_s denotam os valores médios das potências dos sinais na rede primária e secundária, respectivamente.

Para os sinais interferentes da rede primária e secundária, o desvanecimento no canal pode ser dado conforme as distribuições exponenciais dadas por [13]:

$$P_x(x_p) = \frac{1}{X_p} e^{-x_p / X_p}, \tag{3.3}$$

$$P_{z_j}(z_j) = \frac{1}{\mathrm{Z}} e^{-z_j / \mathrm{Z}}, \tag{3.4}$$

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

Para os cálculos apresentados em [13] considera-se que X_p=Y e X_s=Z e que a potência transmitida 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_1 e é dada por:

$$\gamma_1 = \frac{X_p}{Z} = \frac{Y}{X_s}. \tag{3.5}$$

3.2.4 Efeito de captura e probabilidade de captura

Em [13] considera-se o modelo de captura no qual o sinal interferente corresponde a soma de todas as potências recebidas dos UPs e dos USs, excetuando-se o sinal do pacote de interesse de cada rede. Neste modelo, se a potência de um pacote de interesse é maior que a potência interferente total e atende ao limiar da razão de captura (R), o pacote de interesse captura o receptor e é recebido corretamente pelo ponto de acesso primário ou pelo ponto de acesso secundário.

Se o pacote de interesse é gerado por um UP, então a sua probabilidade de captura, $P_{pcap->PAP}$, é calculada por:

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

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 e J_s representam o número de UPs e USs, respectivamente, que tentam transmitir seus pacotes durante o *time slot.*

Se o pacote de interesse é originado na rede secundária, então a probabilidade de captura, é dada pela Eq. (3.7):

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

onde x_s é a potência instantânea do sinal do pacote de interesse.

Considerando que todos os usuários da rede primária e secundária são independentes entre si, as funções densidades de probabilidades conjuntas para os sinais de interesse das redes primária e secundária em relação à interferência são, respectivamente, dadas por [13]:

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

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

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

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 [13]:

$$\begin{aligned} P_{pcap\to PAP}(I_p, J_s) &= \left(\frac{x_p}{\sum_{i=1}^{I_p-1} y_i + \sum_{j=1}^{J_s} z_j} > R \right) = \\ &= \int_0^\infty \ldots \int_0^\infty \int_{R\left(\sum_{i=1}^{I_p-1} y_i + \sum_{j=1}^{J_s} z_j\right)}^\infty \frac{1}{X_p} e^{-\frac{x_p}{X_p}} \prod_{i=1}^{I_p-1} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \\ &\prod_{j=1}^{J_s} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_j}{Z}} dx_p \, dy_1 .. dy_{I_p-1} dz_1 .. dz_{J_s} = \\ &= \left(\frac{X_p}{RY + X_p} \right)^{I_p-1} \left(\frac{X_p}{RZ + X_p} \right)^{J_s} = \\ &= \left(\frac{1}{R+1} \right)^{I_p-1} \left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1} \right)^{J_s} \quad . \end{aligned} \tag{3.10}$$

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 nas redes 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 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 mostrada na Equação (3.11):

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

$$= \int_0^\infty \ldots \int_0^\infty \int_{R\left(\sum_{i=1}^{I_p} y_i + \sum_{j=1}^{J_s-1} z_j\right)}^\infty \frac{1}{X_s} e^{-\frac{x_s}{X_s}}$$

$$\prod_{i=1}^{I_p} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \prod_{j=1}^{J_s-1} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_j}{Z}} dx_s dy_1 \ldots dy_{I_p} dz_1 \ldots dz_{J_s-1} = \quad (3.11)$$

$$= \left(\frac{X_s}{RY + X_s} \right)^{I_p} \left(\frac{X_s}{RZ + X_s} \right)^{J_s-1} =$$

$$= \left(\frac{1}{R\gamma_1 + 1} \right)^{I_p} \left(\frac{1}{R+1} \right)^{J_s-1} .$$

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*.

3.2.5 Cálculo da relação sinal interferência nas redes primária e secundária

O modelo de captura considerado em [13] não considera a PER devido às interferências. Em [14] [48] as análises foram estendidas para considerar este parâmetro. Assim, seguindo [14] [48] [49], para o cálculo da vazão e atraso médio é necessário calcular a PER em função da SIR. O método escolhido é apresentado em [33] e estudado no Capítulo 2, Seção 2.6, deste trabalho.

Para a rede primária, a potência média interferente total (P_{ip}) é igual à soma de todas as potências médias dos pacotes considerados interferentes da rede primária e secundária, excetuando-se a potência do pacote de interesse. Para a rede primária, a P_{ip} pode ser calculada por [14] [48]:

$$P_{ip} = \sum_{i=1}^{I_p-1} Y_i + \sum_{j=1}^{J_s} Z_j . \quad (3.12)$$

Onde Y_i *e* Z_j são as potências médias dos sinais interferentes das redes primária e secundaria, respectivamente, I_p e J_s representam o número de UPs e USs, respectivamente, que estão tentando transmitir seus pacotes durante um *time slot*.

De maneira similar, na rede secundária a potência média interferente total (P_{is}) é dada por:

$$P_{is} = \sum_{i=1}^{I_p} Y_i + \sum_{j=1}^{J_s-1} Z_j . \tag{3.13}$$

O valor médio da relação sinal-interferência da rede primária, (Δ_p) é igual à relação entre X_p, e P_{ip}, dada por:

$$\Delta_p = \frac{X_p}{P_{ip}} = \frac{X_p}{(I_p - 1)Y + J_s Z}. \tag{3.14}$$

Dividindo o numerador e o denominador da Eq.(3.14) por X_p, lembrando que $X_p=Y$ e $\gamma_1=X_p/Z$, tem-se a SIR (Δ_p) para a rede primária, dada por:

$$\Delta_p = \frac{X_p \big/ X_p}{(I_p - 1)Y \big/ X_p + J_s Z \big/ X_p}, \qquad \Delta_p = \frac{1}{(I_p - 1) + J_s \big/ \gamma_1}. \tag{3.15}$$

Para a rede secundária, a SIR (Δ_s) pode ser calculada conforme a expressão:

$$\Delta_s = \frac{X_s}{P_{is}} = \frac{X_s}{I_p Y + \left(J_s - 1\right) Z}. \tag{3.16}$$

Dividindo o numerador e o denominador da Eq.(3.16) por X_s, lembrando que $X_s=Z$ e $\gamma_1=Y/X_s$, tem-se a SIR (Δ_p) para a rede secundária:

$$\Delta_s = \frac{1}{\gamma_1 I_p + \left(J_s - 1\right)}. \tag{3.17}$$

3.2.6 Taxa média de erro de pacotes

Em [33] utiliza-se uma metodologia que permite o cálculo da PER de maneira relativamente simples, por meio de um limitante superior w_0, quando considera-se um canal com desvanecimento Rayleigh.

O valor de w_0 pode ser calculado pela integral, conforme definido no Capítulo 2 na Seção 2.6, reproduzida na Eq.(3.18):

$$w_0 = \int_0^\infty f(\delta) d\delta. \tag{3.18}$$

Considerando um sistema sem codificação de canal e com pacotes de n bits, a função $f(\delta)$ pode ser calculada por [33]:

$$f(\delta) = \left\{1 - \left[1 - b(\delta)\right]^n\right\}, \tag{3.19}$$

onde $b(\delta)$ é a BER do canal. Para a técnica de modulação BPSK, que é a considerada nas análises deste trabalho, tem-se a BER dada por [33]:

$$b(\delta) = \frac{1}{2} erfc(\sqrt{\delta}). \tag{3.20}$$

Usando (3.18), (3.19) e (3.20) pode-se calcular o valor de w_0 utilizando uma ferramenta matemática como, por exemplo, o Mathcad.

A Tabela 3.1 mostra os resultados obtidos para n=127 e n=1023.

Tabela 3.1: *Valores de w_0 para modulação BPSK coerente*

Tamanho do pacote *n* [bits]	**Constante *w0***
Uncoded 127	3,4467
Uncoded 1023	5,3361

Com o valor de w_0 pode-se então calcular o limitante superior para a PER média [33]:

$$P_{ave}(\Delta) \leq 1 - e^{-w_0/\Delta}. \tag{3.21}$$

Onde Δ é a SIR no sistema.

A taxa de sucesso na transmissão de pacotes (PSR - *Packet Success Rate)* pode então ser obtida por:

$$\begin{aligned} PSR(\Delta) &= 1 - P_{ave}(\Delta) \\ PSR(\Delta) &\geq \mathrm{e}^{-w_0/\Delta}. \end{aligned} \tag{3.22}$$

3.2.7 Cálculo da vazão para o modelo original

A vazão global da rede é definida como o número médio total de pacotes gerados pelos UPs e USs que são recebidos corretamente pelo PAP ou PAS, respectivamente, durante um *time slot*, considerando a probabilidade de captura e a PER, conforme [14] [48].

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.

São os três eventos a seguir que podem ocorrer durante um *time slot*:

- Evento *Ep*: o pacote gerado na rede primária é recebido corretamente pelo PAP;
- Evento *Es*: o pacote gerado na rede secundária é recebido corretamente pelo PAS;
- Evento $T_{i,j}$: durante um *time slot* há *i* usuários da rede primária e *j* usuários da rede secundária tentando transmitir pacotes.

Como os UPs se 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, considerando a $PSR(\Delta)$, é dado por [14]:

$$\Pr\left(Ep \mid T_{i,j}\right) = iP_{pcap \to PAP}\left(i, j\right) PSR(\Delta_p). \tag{3.23}$$

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 captura de um pacote de interesse da rede secundária pelo PAS considerando $PSR(\Delta)$, é dado por [14]:

$$\Pr\left(Es \mid T_{i,j}\right) = jP_{scap\to PAS}\left(i,j\right)PSR(\Delta_s). \tag{3.24}$$

A probabilidade de haver *i* UPs tentando transmitir num dado momento, *P*(*itx*), é calculada por:

$$P(itx) = \binom{N_p}{i}\sigma^i{}_p\left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i}. \tag{3.25}$$

De maneira similar, a probabilidade de ter *j* USs tentando transmitir num dado momento é calculada por:

$$P(jtx) = \binom{N_s}{j}\sigma^j{}_s\left(1-\sigma_s\right)^{N_s-j}. \tag{3.26}$$

A vazão da rede primária é dada por [14]:

$$\begin{aligned} V_{op} &= \sum_{i=0}^{N_p}\sum_{j=0}^{N_s}\binom{N_p}{i}\sigma^i{}_p\left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i}\binom{N_s}{j}\sigma^j{}_s\left(1-\sigma_s\right)^{N_s-j} Pr\left(E_p|T_{i,j}\right)PSR(\Delta_p) \\ &= \sum_{i=0}^{N_p}\sum_{j=0}^{N_s}\binom{N_p}{i}\sigma^i{}_p\left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i}\binom{N_s}{j}\sigma^j{}_s\left(1-\sigma_s\right)^{N_s-j} \\ &\qquad i\left(\frac{1}{R+1}\right)^{i-1}\left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1}\right)^{j} e^{-w_0\left[(i-1)+\left(\frac{j}{\gamma_1}\right)\right]}. \end{aligned} \tag{3.27}$$

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

$$\begin{aligned} V_{os} &= \sum_{i=0}^{N_p}\sum_{j=0}^{N_s}\binom{N_p}{i}\sigma^i{}_p\left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i}\binom{N_s}{j}\sigma^j{}_s\left(1-\sigma_s\right)^{N_s-j} Pr\left(E_s|T_{i,j}\right)PSR(\Delta_s) \\ &= \sum_{i=0}^{N_p}\sum_{j=0}^{N_s}\binom{N_p}{i}\sigma^i{}_p\left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i}\binom{N_s}{j}\sigma^j{}_s\left(1-\sigma_s\right)^{N_s-j} \\ &\qquad j\left(\frac{1}{R\gamma_1+1}\right)^{i}\left(\frac{1}{R+1}\right)^{j-1} e^{-w_0[(\gamma_1 i)+(j-1)]}. \end{aligned} \tag{3.28}$$

Finalmente, a vazão global (V_{ot}) é dada por [14] [48]:

$$V_{ot} = V_{op} + V_{os} = \sum_{i=0}^{N_p}\sum_{j=0}^{N_s}\binom{N_p}{i}\sigma^{i}{}_{p}\left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i}\binom{N_s}{j}\sigma^{j}{}_{s}\left(1-\sigma_s\right)^{N_s-j} \left\{ i\left(\frac{1}{R+1}\right)^{i-1}\left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1}\right)^{j} e^{-w_0\left[(i-1)+\left(\frac{j}{\gamma_1}\right)\right]} + \right. \left. + j\left(\frac{1}{R\gamma_1+1}\right)^{i}\left(\frac{1}{R+1}\right)^{j-1} e^{-w_0[(\gamma_1 i)+(j-1)]} \right\}. \quad (3.29)$$

Nas Eq. (3.27), (3.28) e (3.29) considerou-se que os usuários primários e secundários competem pelo acesso ao canal, sendo que a potência praticada pela rede secundária é γ_1 vezes menor que aquela da rede primária, como forma de evitar ou minimizar a interferência sobre os usuários primários.

3.2.8 Cálculo do atraso médio para o modelo original

O atraso médio é definido como o número médio de *time slots* que um usuário primário ou secundário gasta para transmitir um pacote com sucesso, considerando um canal com desvanecimento Rayleigh, efeito de captura e a PER devido às interferências [14] [49].

Sejam P_{op} e P_{os} as probabilidades de que um UP ou US, respectivamente, consiga transmitir com sucesso um pacote de interesse no primeiro *time slot* após a sua geração. O cálculo destas probabilidades depende da captura do pacote de interesse, do número de usuários de cada rede que está tentando transmitir seus pacotes durante um *time slot* e da PSR. Estas probabilidades podem ser representadas conforme as Eq. (3.30) e Eq.(3.31) [14] [49]:

$$P_{op} = \sum_{i=0}^{N_p-1}\sum_{j=0}^{N_s}\binom{N_p-1}{i}\sigma^{i}{}_{p}\left(1-\sigma_p\right)^{N_p-1-i}\binom{N_s}{j}\sigma^{j}{}_{s}\left(1-\sigma_S\right)^{N_S-j} \left(\frac{1}{R+1}\right)^{i}\left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1}\right)^{j} e^{-w_0\left[(i)+\left(\frac{j}{\gamma_1}\right)\right]}, \quad (3.30)$$

$$P_{os} = \sum_{i=0}^{N_p}\sum_{j=0}^{N_s-1}\binom{N_p}{i}\sigma^{i}{}_{p}\left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i}\binom{N_s-1}{j}\sigma^{j}{}_{s}\left(1-\sigma_S\right)^{N_S-1-j} \left(\frac{1}{R+1}\right)^{i}\left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1}\right)^{j} e^{-w_0[(\gamma_1 i)+(j)]}. \quad (3.31)$$

Sejam K_p e K_s as variáveis aleatórias discretas que definem o número de time slots necessários para se transmitir com sucesso um pacote na rede primária e secundária, respectivamente. As funções massas de probabilidade dessas variáveis aleatórias são dadas por [14] [49]:

$$\begin{cases} P_{op}(K_p = k) = P_{op} & \text{para } k = 1 \\ P_{op}(K_p = k) = (1-P_{op})(1-P_{op}\sigma_p)^{k-2} P_{op}\sigma_p & \text{para } k>1. \end{cases} \tag{3.32}$$

$$\begin{cases} P_{os}(K_s = k) = P_{os} & \text{para } k = 1 \\ P_{os}(K_s = k) = (1-P_{os})(1-P_{os}\sigma_s)^{k-2} P_{os}\sigma_s & \text{para } k > 1. \end{cases} \tag{3.33}$$

Calculando o valor esperado da variável aleatória K_p obtém-se o atraso médio para a rede primária, D_{op} [14] [49]:

$$E\left[K_p\right] = D_{op} = P_{op} + (1-P_{op})P_{op}\sigma_p \left[\sum_{k=2}^{\infty} k(1-P_{op}\sigma_p)^{k-2}\right]. \tag{3.34}$$

Fazendo $j=k-2$

$$D_{op} = P_{op} + (1-P_{op})P_{op}\sigma_p \left[\sum_{j=0}^{\infty} (j+2)(1-P_{op}\sigma_p)^{j}\right]. \tag{3.35}$$

A Eq.(3.35) converge para:

$$D_{op} = P_{op} + (1-P_{op})P_{op}\sigma_p \left[\frac{1}{\left(P_{op}\sigma_p\right)^2\left(1-P_{op}\sigma_p\right)} - \frac{1}{\left(1-P_{op}\sigma_p\right)}\right]. \tag{3.36}$$

Simplificando a Eq.(3.36) obtém-se o atraso médio para a rede primária, D_{op}, dado por [14] [49]:

$$D_{op} = 1 + \frac{1-P_{op}}{P_{op}\sigma_p}. \tag{3.37}$$

De maneira similar, calculando o valor esperado da variável aleatória K_s obtém-se o atraso médio para a rede secundária, dado por [14] [49]:

$$D_{os} = 1 + \frac{1-P_{os}}{P_{os}\sigma_s}. \tag{3.38}$$

3.3 Novo modelo do sistema

Nesta seção, uma extensão do modelo original é apresentada, criando assim um novo modelo que leva em conta na análise de desempenho dois aspectos importantes que não foram considerados no modelo original: sensoriamento imperfeito e diferentes níveis de potência de transmissão na rede secundária.

No novo modelo adota-se o sensoriamento centralizado na rede cognitiva, onde o processo de decisão e divulgação a respeito do estado do canal é feito no PAS.

No modelo original o canal pode ser compartilhado entre os UPs e USs independentemente do seu estado. No novo modelo essa abordagem é mantida. No entanto, o nível de potência praticada pelos USs agora depende da decisão do PAS sobre o estado do canal.

Para a comparação dos resultados, a arquitetura da Figura 3.1 e o modelo de tráfego da Figura 3.2, considerados no modelo original, foram mantidos no novo modelo.

3.3.1 Desvanecimento do novo sistema

O modelo de desvanecimento da rede primária do novo modelo segue o mesmo apresentado na Eq.(3.1) e Eq.(3.3) da Seção 3.2.3 do modelo original.

O modelo de desvanecimento na rede secundária, dado pela Eq. (3.2) e (3.4) da Seção 3.2.3, é modificado para considerar os diferentes níveis de potência de transmissão em função da decisão sobre o estado do canal, conforme apresentado nas Eq.(3.39) e Eq.(3.40):

$$P_x(x_{s_\Phi}) = \frac{1}{X_{s_\Phi}} e^{-x_{s_\Phi} / X_{s_\Phi}}, \tag{3.39}$$

$$P_x(x_{s_\Phi}) = \frac{1}{X_{s_\Phi}} e^{-x_{s_\Phi} / X_{s_\Phi}}, \tag{3.40}$$

Onde Φ denota a decisão a respeito do estado do canal ($\Phi=0$ representa a decisão canal livre e $\Phi=1$ representa a decisão canal ocupado), x_{s_Φ} denota a potência

instantânea do pacote de interesse da rede secundária, X_{s_Φ} é o valor médio da potência do pacote de interesse da rede secundária, z_Φ representa o valor instantâneo da potência interferente da rede secundária e Z_Φ o valor médio da potência interferente da rede secundária.

No novo modelo, quando a decisão a respeito do estado do canal é livre, o nível de potência praticado pelo US é maior em relação ao caso em que o canal é dado como ocupado.

A relação entre os valores médios das potências do novo sistema agora depende da decisão sobre o estado do canal, onde $X_{s\Phi}=Z_\Phi$ e $X_p=Y$, é dado por:

$$\gamma_\Phi = \frac{X_p}{Z_\Phi} = \frac{Y}{X_{S_\Phi}}. \tag{3.41}$$

3.3.2 Efeito de captura e probabilidade de captura do novo modelo

Se o pacote de interesse é gerado por um UP, a probabilidade de captura é dada pela Eq. (3.6) da Seção 3.2.4, modificada para considerar os diferentes níveis de potência na rede secundária em função da decisão do estado real do canal resultando em:

$$P_{pcap_\Phi \to PAP}(I_p, J_s) = \left(\frac{x_p}{\sum_{i=1}^{I_p-1} y_i + \sum_{j=1}^{J_s} z_{j_\Phi}} > R \right). \tag{3.42}$$

Onde $\sum z_{j_\Phi}$ representa a potência instantânea interferente da rede secundária, y_i é a potência instantânea interferente proveniente de uma estação primária e x_p denota a potência instantânea do pacote de interesse gerado por um UP.

Se o pacote de interesse é gerado por um US, a probabilidade de captura é calculada modificando a Eq. (3.7) da Seção 3.2.4 para considerar os diferentes níveis de potência na rede secundária de acordo com a decisão sobre o estado do canal, resultando em:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{scap}_{\Phi}\rightarrow\mathrm{PAS}}(I_p, J_s) = \left(\frac{x_{s\Phi}}{\sum_{i=1}^{I_p} y_i + \sum_{j=1}^{J_S-1} z_{j_\Phi}} > R \right). \tag{3.43}$$

Onde x_{s_Φ} é a potência instantânea do pacote de interesse gerado por um US, y_i representa a potência instantânea do sinal interferente proveniente de um UP, $\sum z_{j_\Phi}$representa a potência instantânea interferente da rede secundária.

A f.d.p de $\sum z_{j_\Phi}$ é obtida adicionando-se J_s ou J_s*-1* variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuidas (iid) com distribuição exponencial, o que resulta na distribuição de Erlang apresentada na Eq.(3.44) [51]:

$$f(\sum \mathrm{z}_{\Phi}) = \frac{(C_{\Phi})^{j} (z_{\Phi})^{(j-1)} e^{-z_{\Phi} C_{\Phi}}}{(j-1)!}. \tag{3.44}$$

Na Eq.(3.44), quando o pacote de interesse é proveniente da rede primária tem-se $j=J_s$, e quando o pacote de interesse é proveniente da rede secundária tem-se $j=Js-1$. O parâmetro C_Φ está associado ao valor médio da potência interferente da rede secundária e é dado por [51]:

$$C_{\Phi} = 1/Z_{\Phi}. \tag{3.45}$$

Considerando que todos UPs e USs são mutuamente independentes entre si, a função densidade de probabilidade conjunta para as potências de interesse das redes primária e secundária são representadas por:

$$f\left(x_p, y_1, \ldots, y_{I_p-1}, \mathrm{z}_{\Phi}\right) = \left(\frac{1}{X_p} e^{-\frac{x_p}{X_p}} \prod_{i=1}^{I_p-1} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \right) \frac{(C_{\Phi})^{j} (z_{\Phi})^{(j-1)} \mathrm{e}^{-C_{\Phi} z_{\Phi}}}{(j-1)!}, \tag{3.46}$$

$$f\left(x_s, y_1, \ldots, y_{I_p}, \mathrm{z}_{\Phi}\right) = \left(\frac{1}{X_s} e^{-\frac{x_s}{X_s}} \prod_{i=1}^{I_p} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \right) \frac{(C_{\Phi})^{j} (z_{\Phi})^{(j-1)} \mathrm{e}^{-C_{\Phi} z_{\Phi}}}{(j-1)!}. \tag{3.47}$$

Para o cálculo da probabilidade de captura é necessário resolver as integrais dadas pelas equações (3.48) e (3.49) para as redes primária e secundária, respectivamente:

$$\int_0^\infty \int_0^\infty \int_{R\left(\sum_{i=1}^{I_p-1} y_i + \sum z_\Phi\right)}^\infty \frac{1}{X_p} e^{-\frac{x_p}{X_p}} \prod_{i=1}^{I_p-1} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \frac{(C_\Phi)^j (z_\Phi)^{(j-1)} e^{-C_\Phi z_\Phi}}{(j-1)!} dx_p dy_1 ... dy_{I_p-1} dz_\Phi, \quad (3.48)$$

$$\int_0^\infty \int_0^\infty \int_{R\left(\sum_{i=1}^{I_p} y_i + \sum z_\Phi\right)}^\infty \frac{1}{X_s} e^{-\frac{x_s}{X_s}} \prod_{i=1}^{I_p} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \frac{(C_\Phi)^j (z_\Phi)^{(j-1)} e^{-C_\Phi z_\Phi}}{(j-1)!} dx_s dy_1 ... dy_{I_p} dz_\Phi. \quad (3.49)$$

Resolvendo a Eq.(3.48) a probabilidade de captura na rede primária do novo modelo é dada por:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{pcap}_\Phi \to \mathrm{PAP}}(I_p, J_s) = \left[\left(\frac{X_p}{RY + X_p} \right)^{I_p\text{-}1} \left(\frac{X_p}{RZ_\Phi + X_p} \right)^{J_s} \right]. \quad (3.50)$$

Sabendo que $X_p=Y$ e $\gamma_\Phi=X_p/Z_\Phi$, a Eq.(3.50) pode ser reescrita como:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{pcap}_\Phi \to \mathrm{PAP}}(I_p, J_s) = \left[\left(\frac{1}{R+1} \right)^{I_p\text{-}1} \left(\frac{\gamma_\Phi}{R+\gamma_\Phi} \right)^{J_s} \right]. \quad (3.51)$$

No início de um *time slot* o PAS deve decidir se o canal está livre ou ocupado, de forma que os USs pratiquem níveis de potência que minimizem as interferências na rede primária caso o UP esteja em transmissão no canal.

Se o PAS detecta o canal como ocupado, o que ocorre com probabilidade P_d, os USs transmitem uma potência menor, que é caracterizado por $\Phi=1$ na Eq.(3.51). Se a decisão for que o canal esta livre, o que ocorre com probabilidade $P_{ed}=(1-P_d)$, os USs transmitem uma potência mais alta, o que é caracterizado por $\Phi=0$ na Eq.(3.51). Assim, a Equação (3.51) é modificada para incluir o efeito da decisão do PAS sobre o estado do canal, resultando em:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{pcap}_\Phi \to \mathrm{PAP}}(I_p, J_s) = \left[\left(\frac{1}{R+1} \right)^{I_p\text{-}1} \left[\left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1} \right)^{J_s} P_d + \left(\frac{\gamma_0}{R+\gamma_0} \right)^{J_s} P_{ed} \right] \right]. \quad (3.52)$$

A Eq.(3.52) mostra que a probabilidade de captura do PAP pelo pacote de interesse de um UP depende do limiar da razão de captura (R), do número de usuários

competindo em um *time slot* e da relação entre as potências praticadas nas redes primária e secundária.

Resolvendo a Eq.(3.49) a probabilidade de captura na rede secundária do novo modelo é dada por:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{scap}_{\Phi}\rightarrow PAS}(I_p, J_s) = \left[\left(\frac{X_{s\Phi}}{RY + X_{s\Phi}} \right)^{I_p} \left(\frac{X_{s\Phi}}{RZ_{\Phi} + X_{s\Phi}} \right)^{J_s - 1} \right]. \quad (3.53)$$

Lembrando que $X_{s\Phi}=Z_{\Phi}$ e $\gamma_{\Phi}=Y/X_{s\Phi,}$ substituindo Y e Z_{Φ} na Eq.(3.53) tem-se:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{scap}_{\Phi}\rightarrow PAS}(I_p, J_s) = \left[\left(\left(\frac{1}{R\gamma_{\Phi} + 1} \right)^{I_p} \right) \left(\frac{1}{R+1} \right)^{J_s - 1} \right]. \quad (3.54)$$

A probabilidade de captura do novo modelo na rede secundária depende se o estado real do canal for ocupado ou livre.

Se o estado real do canal é ocupado, $I_p \geq 1$, a probabilidade de captura na rede secundária do novo modelo, representada pela Eq.(3.54), deve ser modificada para considerar as probabilidades do PAS decidir que o canal está ocupado, o que ocorre com probabilidade P_d, ou livre, o que ocorre com probabilidade $P_{ed}=1-P_d$. De novo, se a decisão é que o canal está ocupado, os USs transmitem uma potência menor, o que é caracterizado por $\Phi=1$ na Eq.(3.54); se a decisão é que o canal está livre, os USs transmitem uma potência maior, o que é caracterizado por $\Phi=0$ na Eq.(3.54). A probabilidade de captura torna-se:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{scap}_{\Phi}\rightarrow PAS_{Ocupado}}(I_p, J_s) = \left[\left(\left(\frac{1}{R\gamma_1 + 1} \right)^{I_p} P_d + \left(\frac{1}{R\gamma_0 + 1} \right)^{I_p} P_{ed} \right) \left(\frac{1}{R+1} \right)^{J_s - 1} \right]. \quad (3.55)$$

Se o estado real do canal é livre, tem-se $I_p=0$.

E a Eq.(3.54) se ressume a:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{scap}_{\Phi}\rightarrow PAS_{Livre}}(I_p, J_s) = \left[\left(\frac{1}{R+1} \right)^{J_s - 1} \right]. \quad (3.56)$$

Note que neste caso a decisão do PAS sobre o estado do canal não influencia a probabilidade de captura na rede secundária, pois todos os USs praticam a mesma potência.

No cálculo da probabilidade de captura da rede secundária, nas equações (3.55) e (3.56), quanto maior o valor de *R* ou o número de usuários interferentes em um *time slot*, menor é a probabilidade do PAS capturar um pacote de interesse.

3.3.3 Cálculo da relação sinal interferência do novo modelo

Para o cálculo da potência interferente total na rede primária no novo modelo é usada a mesma abordagem da Eq.(3.12) da Seção 3.2.5. A potência interferente total na rede primária é modificada para considerar os diferentes níveis de potência de transmissão na rede secundária em função da decisão sobre o estado do canal, como mostrado na Eq. (3.57):

$$P_{ip_{\Phi}} = \sum_{i=1}^{I_p-1} Y_i + \sum_{j=1}^{J_s} Z_{j\Phi} = (I_p - 1)Y + \left(J_s\right)Z_{\Phi}. \tag{3.57}$$

De forma similar, o cálculo da potência interferente total na rede secundária da Eq.(3.13) da Seção 3.2.5 é modificado no novo modelo, representado por $P_{is_{\Phi}}$, dada pela Eq. (3.58):

$$P_{is_{\Phi}} = \sum_{i=1}^{I_p} Y_i + \sum_{j=1}^{J_s-1} Z_{j\Phi} = I_p Y + (J_s - 1)Z_{\Phi}. \tag{3.58}$$

Finalmente o valor da SIR do novo modelo para a rede primária é igual à relação entre a potência média do sinal do pacote de interesse desta rede, X_p, e a potência média interferente total $P_{ip_{\Phi}}$, dada pela Eq.(3.59):

$$\Delta_{p_{\Phi}} = \frac{X_p}{P_{ip_{\Phi}}} = \frac{X_p}{(I_p - 1)\mathrm{Y} + J_s Z_{\Phi}}. \tag{3.59}$$

Dividindo o numerador e o denominador da Eq.(3.59) por X_p, sabendo que $X_p=Y$ e $\gamma_{\Phi}=X_p/Z_{\Phi}$, tem-se a SIR para a rede primária, dado por:

$$\Delta_{p_\Phi} = \frac{\frac{X_p}{X_p}}{\frac{(I_p - 1)Y}{X_p} + \left(\frac{J_s Z_\Phi}{X_p}\right)} = \frac{1}{(I_p - 1) + \frac{J_s}{\gamma_\Phi}}. \quad (3.60)$$

Para a rede secundária, a SIR, $\Delta_{s\Phi}$, pode ser calculada por:

$$\Delta_{s_\Phi} = \frac{X_{s_\Phi}}{P_{is_\Phi}} = \frac{X_{s_\Phi}}{I_p \mathrm{Y} + (J_s - 1) Z_\Phi}, \quad (3.61)$$

dividindo o numerador e o denominador da Eq.(3.61) por $X_{s\Phi}$, sabendo que $X_{s\Phi}=Z$ e $\gamma_\Phi=Y/X_{s\Phi}$, tem-se a SIR para a rede secundária a seguir:

$$\Delta_{s_\Phi} = \frac{1}{\gamma_\Phi I_p + (J_s - 1)}. \quad (3.62)$$

Finalmente a PSR e a PER do novo modelo podem ser obtidas, respectivamente, pelas Eq.(3.63) e Eq.(3.64):

$$PSR(\Delta_\Phi) \geq \mathrm{e}^{-w_0 / \Delta_\Phi}, \quad (3.63)$$

$$P_{ave}(\Delta_\Phi) \leq 1 - \mathrm{e}^{-w_0 / \Delta_\Phi}. \quad (3.64)$$

3.3.4 Vazão total do novo modelo

A vazão total da rede, V_{nt}, novamente é definida como o número total de pacotes gerados pelos UPs e USs que são recebidos corretamente pelo PAP ou PAS, respectivamente, durante um *time slot*.

Como os UPs comunicam com o PAP e os USs com o PAS, a probabilidade condicional de que um pacote de interesse gerado por um usuário primário seja recebido corretamente pelo PAP, é representada por:

$$\Pr\left(Ep \mid T_{i,j}\right) = iP_{pcap_\Phi \to PAP}(i, j)\, PSR(\Delta_{p_\Phi}). \quad (3.65)$$

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 corretamente pelo PAS secundário é dado por:

$$\Pr\left(Es \mid T_{i,j}\right) = jP_{scap_{\Phi} \to PAS}\left(i, j\right) PSR(\Delta_{s_{\Phi}}). \tag{3.66}$$

O cálculo da vazão da rede primária (V_{np}) e secundária (V_{ns}) são dadas, respectivamente, pelas Eq.(3.67) e (3.68):

$$V_{np} = \left(\begin{array}{c} \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} {\sigma_p}^i \left(1-\sigma_p\right)^{N_p - i} \binom{N_s}{i} {\sigma_s}^j \left(1-\sigma_s\right)^{N_s - j} \\ i\left[\frac{1}{R+1}\right]^{i-1} \left(\begin{array}{l} \left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1}\right)^j e^{w_0\left[(i-1)+\left(\frac{j}{\gamma_1}\right)\right]} P_d + \\ +\left(\frac{\gamma_0}{R+\gamma_0}\right)^j e^{w_0\left((i-1)+\left(\frac{j}{\gamma_0}\right)\right)} P_{ed} \end{array} \right) \end{array} \right). \tag{3.67}$$

$$V_{ns} = \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{c} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} {\sigma_p}^i \left(1-\sigma_p\right)^{N_p - i} \binom{N_s}{j} {\sigma_s}^j \left(1-\sigma_s\right)^{N_s - j} \\ j\left[\frac{1}{R+1}\right]^{j-1} \left(\begin{array}{l} \left(\frac{1}{R\gamma_1+1}\right)^i e^{-w_0\left[(j-1)+(\gamma_1 i)\right]} P_d + \\ +\left(\frac{1}{R\gamma_0+1}\right)^i e^{-w_0\left[(j-1)+(\gamma_0 i)\right]} P_{ed} \end{array} \right) \end{array} \right] + \\ \left[\sum_{j=0}^{N_s} \left(1-\sigma_p\right)^{N_p} \binom{N_s}{j} {\sigma_s}^j \left(1-\sigma_s\right)^{N_s - j} j\left[\frac{1}{R+1}\right]^{j-1} e^{w_0(j-1)} \right] \end{array} \right]. \tag{3.68}$$

Finalmente, a vazão total é obtida através da soma das Eq.(3.67) e Eq.(3.68):

$$V_{nt} \cong V_{np} + V_{ns}. \tag{3.69}$$

3.3.5 Atraso médio do novo modelo

O atraso médio é novamente definido como o número médio de *time slots* necessários para se transmitir um pacote com sucesso, considerando aqui um canal com desvanecimento Rayleigh, sensoriamento imperfeito, níveis diferentes de potência de transmissão por parte do US, efeito de captura e a PER.

Sejam P_{np} e P_{ns} as probabilidades de que um UP ou US, respectivamente, consiga transmitir com sucesso um pacote de interesse no primeiro *time slot* após a sua geração. O cálculo destas probabilidades depende da captura do pacote de interesse, do número de usuários de cada rede que está tentando transmitir seus pacotes durante um *time slot* e da PSR. Estas probabilidades podem ser representadas conforme a Eq.(3.70) e a Eq.(3.71):

A P_{np} pode ser representada conforme a equação (3.70).

$$P_{np} = \left[\begin{array}{l} \sum_{i=0}^{N_p-1} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p-1}{i} \sigma_p^{\,i} \left(1-\sigma_p\right)^{N_p-1-i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^{\,j} \left(1-\sigma_S\right)^{N_S-j} \\ \left(\frac{1}{R+1}\right)^i \left(\left(\left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1}\right)^j P_d \, \mathrm{e}^{-w_0\left[(i)+\left(\frac{j}{\gamma_1}\right)\right]} \right) + \left(\left(\frac{\gamma_0}{R+\gamma_0}\right)^j P_{ed} \, \mathrm{e}^{-w_0\left[(i)+\left(\frac{j}{\gamma_0}\right)\right]} \right) \right) \end{array} \right]. \quad (3.70)$$

De igual modo o cálculo da P_{ns} é dado pela equação (3.71):

$$P_{ns} = \left[\begin{array}{l} \sum_{i=0}^{N_p-1} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p-1}{i} \sigma_p^{\,i} \left(1-\sigma_p\right)^{N_p-1-i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^{\,j} \left(1-\sigma_S\right)^{N_S-j} \\ \left(\frac{1}{R+1}\right)^i \left(\left(\left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1}\right)^j P_d \, \mathrm{e}^{-w_0\left[(i)+\left(\frac{j}{\gamma_1}\right)\right]} \right) + \left(\left(\frac{\gamma_0}{R+\gamma_0}\right)^j P_{ed} \, \mathrm{e}^{-w_0\left[(i)+\left(\frac{j}{\gamma_0}\right)\right]} \right) \right) \end{array} \right]. \quad (3.71)$$

Nas Eq.(3.70) e Eq.(3.71), a inclusão dos parâmetros P_d *e* P_{ed} representam a probabilidade que o PAS tem de decidir sobre o estado em que canal se encontra em um *time slot* (ocupado ou livre), como já discutido na Seção 3.3.2.

Sejam K_{np} e K_{ns} as variáveis aleatórias discretas que definem o número de *time slots* necessários para se transmitir com sucesso um pacote na rede primária e

secundária, respectivamente. As funções massas de probabilidade dessas variáveis aleatórias são dadas por [14]:

$$\begin{cases} P_{np}(K_{np}=k)=P_{np} & \text{para } k=1 \\ P_{np}(K_{np}=k)=(1-P_{np})(1-P_{np}\sigma_p)^{k-2}P_{np}\sigma_p & \text{para } k>1. \end{cases} \tag{3.72}$$

$$\begin{cases} P_{ns}(K_{ns}=k)=P_{ns} & \text{para } k=1 \\ P_{ns}(K_{ns}=k)=(1-P_{ns})(1-P_{ns}\sigma_s)^{k-2}P_{ns}\sigma_s & \text{para } k>1. \end{cases} \tag{3.73}$$

Calculando o valor esperado da variável aleatória na rede primaria, K_{np}, obtém-se o atraso médio para a rede primária, D_{np}, dado por:

$$D_{np} = 1+\frac{1-P_{np}}{P_{np}\sigma_p}. \tag{3.74}$$

De igual modo calculando o valor esperado da variável aleatória na rede secundária, K_{ns}, obtém-se o atraso médio para a rede secundária, D_{ns}, dado por:

$$D_{ns} = 1+\frac{1-P_{ns}}{P_{ns}\sigma_s}. \tag{3.75}$$

3.4 Análises e resultados

Nesta seção são mostrados e comparados os resultados numéricos obtidos para o novo modelo. Estes resultados são defrontados com os resultados do modelo original apresentados em [14]. Para que tal comparação fosse possível, os parâmetros e considerações feitas 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 das probabilidades de geração e retransmissão de pacotes na rede primária, σ_p, e na secundária, σ_s.

A carga da rede primária é calculada pela Eq. (3.76) [13] [14]:

$$G_p = N_p\sigma_p. \tag{3.76}$$

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 primária e secundária, conforme dado por:

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_p}. \tag{3.77}$$

O fator *m* define a quantidade de pacotes que são gerados ou retransmitidos pelos USs da rede cognitiva por *time slots,* quando comparado aos pacotes gerados pela rede primária. 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 cognitiva em um dado *time slot*.

Os gráficos para a vazão das redes primária, secundária e global são apresentados nas Figuras 3.3 a Figura 3.15 e para o atraso médio das redes primária e secundária são mostrados nas Figuras 3.16 a 3.23. Todos os gráficos foram traçados para o modelo original e o novo modelo, considerando modulação BPSK coerente, sem codificação de canal e tamanho de pacote igual a 127 [*bits*]. Para comparação dos resultados entre o novo modelo e o original, foram considerados os mesmos parâmetros de [14]: $N_p = N_s = 30$, R=3 [dB], γ_1=10, w_0=*-3,4467* e m = 1, 2 e 5. Para o novo modelo são adicionados os parâmetros P_d e γ_0.

A **Figura 3.3** apresenta a influência da probabilidade de detecção na vazão da rede primária. Percebe-se que o desempenho do sistema diminui à medida em que o valor de P_d diminui. Para que a vazão da rede primária tenha bom resultado é necessário que o valor de P_d seja o mais elevado possível, o que garante que os USs praticam níveis de potência menores que aquelas praticadas na rede primária e como consequência minimiza a interferência na rede primária. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original, apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

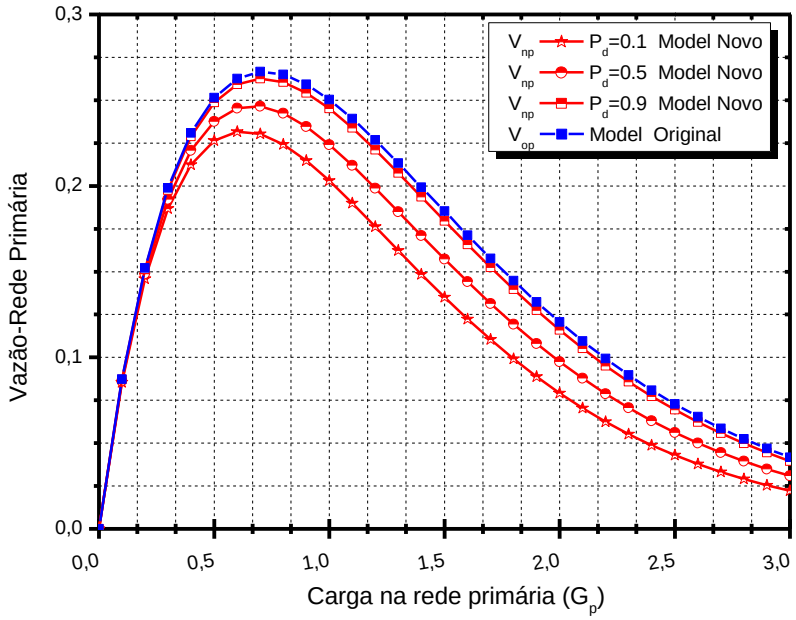


Figura 3.3: *Vazão rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB ,m=1 e γ_0=5).*

A **Figura 3.4** mostra a influência do parâmetro γ_0 na vazão da rede primária para uma P_d fixada em 0.9. Nestas condições a probabilidade do PAS detectar o canal como livre e usar γ_0 como a relação de potência entre o UP e US é baixa (P_{ed}= 1-P_d). Por esta razão, percebe-se que o parâmetro γ_0 tem pouca influência sobre a vazão da rede primária. No entanto, à medida em que γ_0 cresce, a probabilidade de captura pelo PAP aumenta e a vazão também. Comparando os modelos verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção e diferentes níveis de potência na rede secundária.

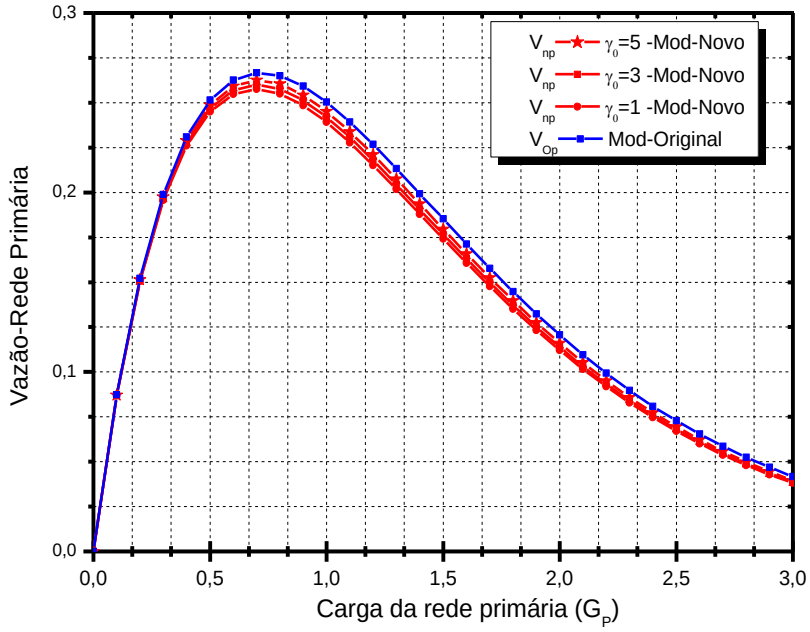


Figura 3.4: *Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, P_d=0.9 e m=1).*

A **Figura 3.5** mostra a influência do parâmetro γ_1 na vazão da rede primária para uma P_d fixada em 0.9. Nestas condições a probabilidade do PAS detectar o canal ocupado e usar os valores γ_1 (10, 20, 50) adotados na figura é alta. Verifica-se que à medida em que o valor de γ_1 aumenta, a probabilidade de um pacote primário ser capturado pelo PAP cresce e, portanto, aumenta a vazão da rede primária. Comparando os modelos verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, por este último considerar o erro de detecção e diferentes níveis de potência.

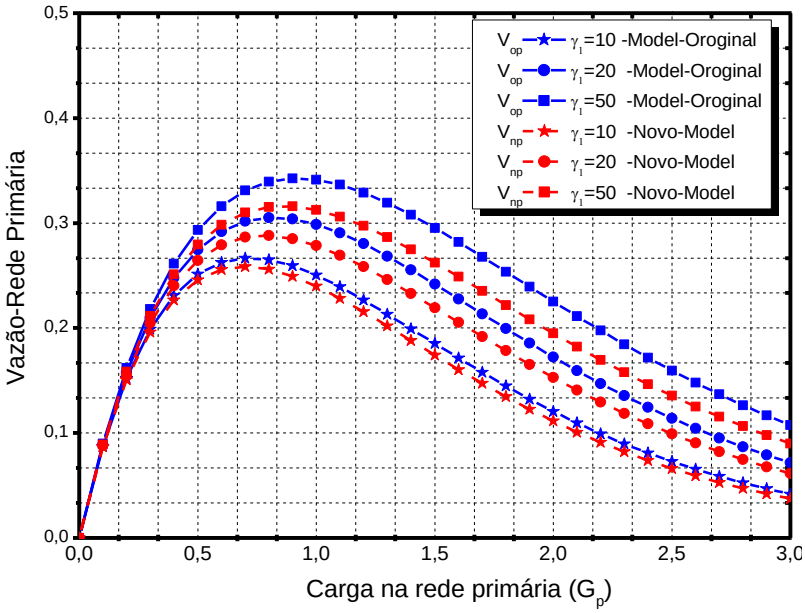


Figura 3.5: *Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, P_d=0.9 e m=1).*

A **Figura 3.6** apresenta a influência do parâmetro *m* na vazão da rede primária. À medida em que o valor de *m* cresce (1, 2, 5), o número de USs que tentam transmitir pacotes na rede secundária também cresce e, portanto, aumenta a quantidade de interferência na rede primária. Neste contexto, pode-se observar que o desempenho da rede primária de ambos os modelos (original e novo) diminuem. Comparando os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado ligeiramente otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo.

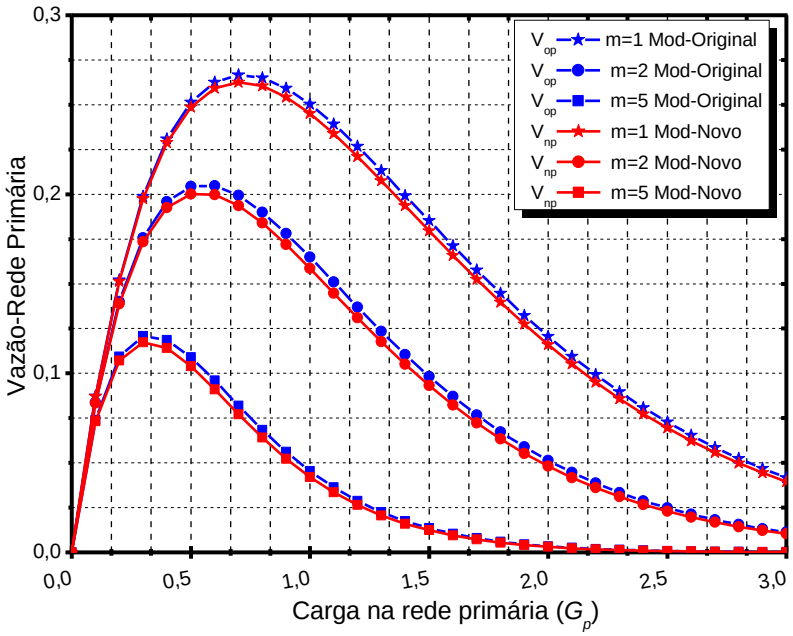


Figura 3.6: *Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, P_d=0.9 e γ_0=5).*

A **Figura 3.7** apresenta a influência do parâmetro N_s no cálculo da vazão da rede primária. À medida em que o valor de N_s cresce, aumenta a interferência na rede primária e consequentemente cai a vazão na rede primária. O modelo original apresenta resultado ligeiramente otimista em relação ao novo modelo.

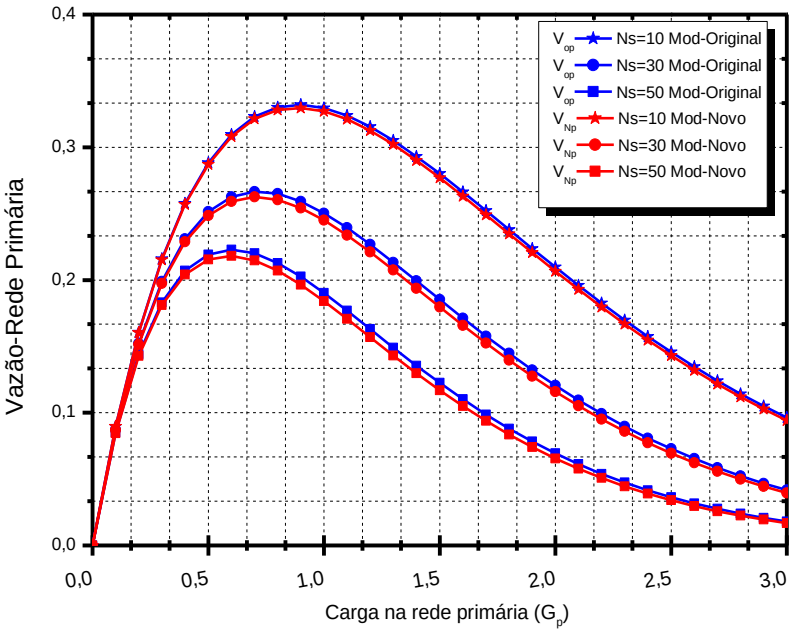


Figura 3.7: *Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=30, γ_1=10, R=3dB, P_d=0.9, γ_0=5, m=1).*

A **Figura 3.8** apresenta a influência da probabilidade de detecção na vazão da rede secundária. Quando há transmissões simultâneas entre UPs e USs no canal, a probabilidade de um pacote secundário ser capturado pelo PAS é muito baixa, devido aos altos níveis de interferências causados principalmente pelos UPs; logo, P_d, não influencia no desempenho da rede secundária. Quando as potências interferentes são causadas unicamente pelos USs, de igual modo P_d não interfere no desempenho da rede secundária, pois todos USs utilizam a mesma potência. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que ambos os modelos apresentam resultados semelhantes.

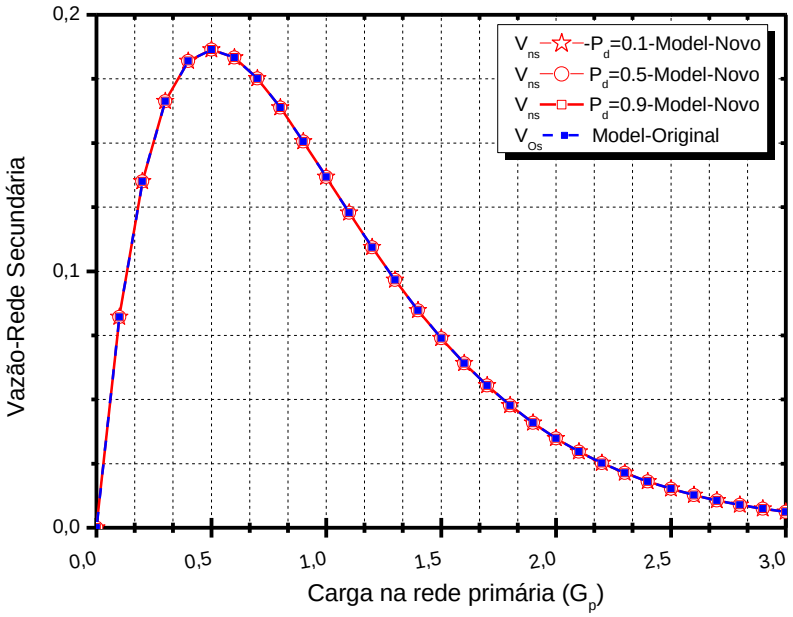


Figura 3.8: *Vazão da rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30 γ_1=10, R=3dB, γ_0=5 e m=1).*

A **Figura 3.9** apresenta a influência de γ_0 na vazão da rede secundária para um valor de P_d fixado em 0.9. Se há transmissão simultânea entre UPs e USs, os USs utilizarão uma potência 10 vezes menor do que os UPs (γ_1=*10*) com probabilidade 0.9 (P_d=*0.9*) e a probabilidade de captura do pacote pelo PAS é próxima de zero (não contribuindo para a vazão da rede secundária); por outro lado, os USs utilizarão uma potência γ_0 vezes menor do que os UPs com probabilidade 0.1(P_{ed}=*1*- P_d). No entanto, mesmo neste último caso e mesmo com γ_0=*1*, a contribuição deste cenário para a vazão da rede secundária é muito menor do que a vazão obtida quando não há transmissão da rede primária, situação na qual o valor de γ não influencia na vazão, pois todos os USs utilizam a mesma potência. Logo, concluímos que o valor de γ_0 não

influencia na vazão da rede secundária e os resultados obtidos com o modelo original e o novo modelo são idênticos.

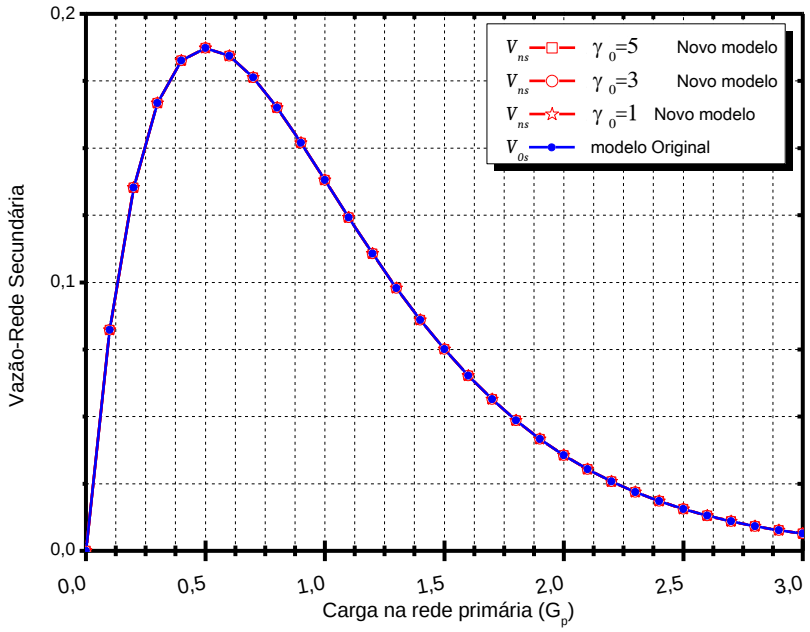


Figura 3.9: *Vazão da rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, $\gamma 1$=10, R=3dB, P_d=0.9 e m=1).*

A **Figura 3.10** apresenta a influência de γ_1 na vazão da rede secundária para um valor de P_d fixado em 0.9. Se há transmissão simultânea entre UPs e USs, os USs utilizarão uma potência entre 10 e 50 vezes menor do que os UPs (γ_1=*10, 20* e *50*) com probabilidade 0.9 (P_d=*0.9*) e a probabilidade de captura pelo PAS é próxima de zero para qualquer um dos valores de γ_1 (não contribuindo para a vazão da rede secundária); por outro lado, os USs utilizarão uma potência γ_0=*5* vezes menor do que os UPs com probabilidade 0.1(P_{ed}=1- P_d). No entanto, mesmo neste ultimo caso, a contribuição deste cenário para a vazão da rede secundária é muito menor do que a vazão obtida quando não há transmissão na rede primária, situação na qual o valor de γ não influencia na vazão, pois todos os USs utilizam a mesma potência. Logo, concluímos que o valor de γ_1 não influencia na vazão da rede secundária e os resultados obtidos com o modelo original e o novo modelo são idênticos.

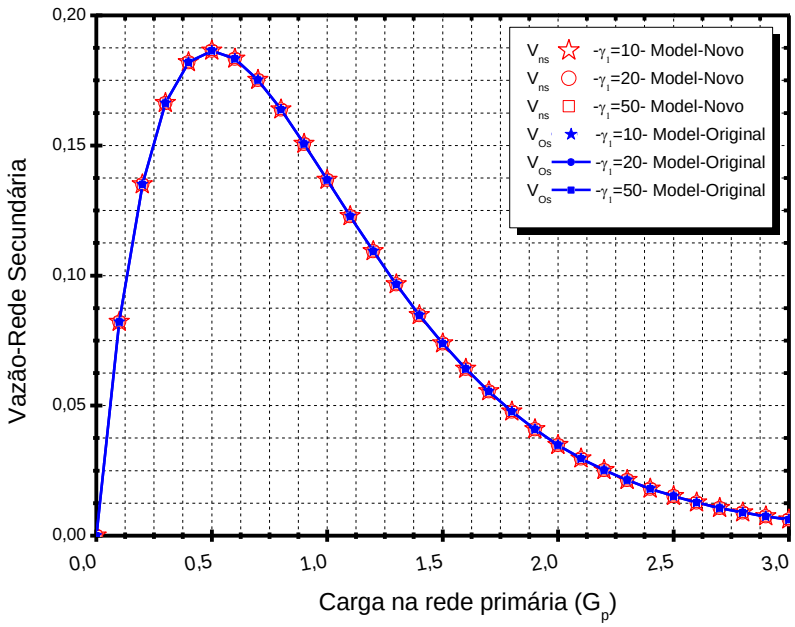


Figura 3.10: *Vazão da rede Secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, R=3dB, P_d=0.9,m=1 e γ_0=5).*

A Figura 3.11 apresenta a influência do parâmetro *m* na vazão da rede secundária. Para valores pequenos de carga na rede primária, à medida em que o valor de *m* cresce, o número de USs que tentam transmitir pacotes na rede secundária também cresce, o que aumenta a probabilidade de captura pelo PAS e a vazão da rede secundária. A partir de um certo valor de carga na rede primária, contudo, a probabilidade de captura na rede secundária é pequena, devido à grande interferência proveniente da rede primária. Neste cenário, o aumento de *m*, que resulta no aumento de carga na rede secundária, diminui ainda mais a probabilidade de captura na rede secundária e, consequentemente, a vazão nesta rede. Como P_d, γ_0 e γ_1 não têm influência sobre o desempenho na rede secundária do novo modelo, os resultados obtidos com o modelo original e o novo modelo são idênticos.

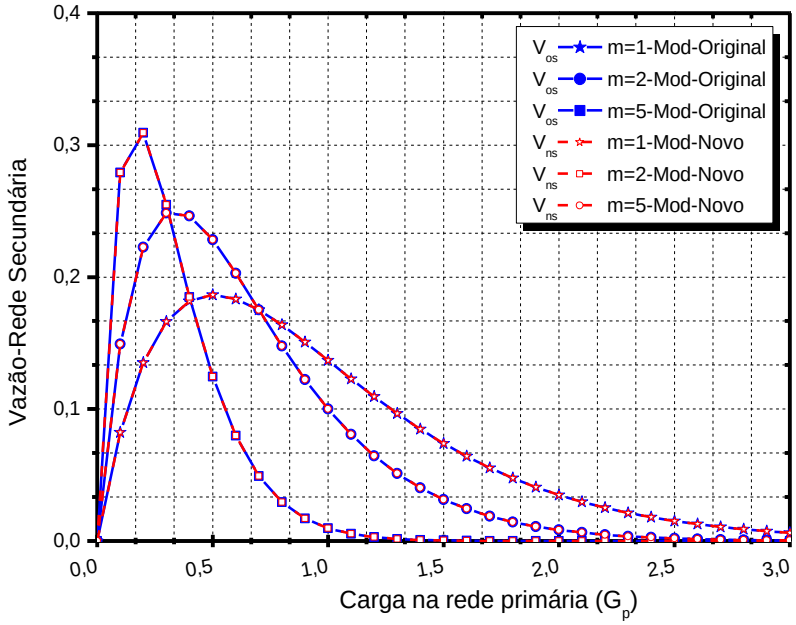


Figura 3.11: *Vazão da rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, P_d=0.9 e γ_0=5).*

A **Figura 3.12** apresenta a influência do parâmetro N_s no cálculo da vazão da rede secundária. A conclusão é semelhante àquela apresentada para a Figura 3.11. Para valores de carga na rede primária pequenos, à medida em que o valor de N_s cresce, aumenta a chance dos USs transmitirem pacotes, o que aumenta a probabilidade de captura pelo PAS e a vazão na rede secundária. No entanto, a partir de um certo valor de carga na rede primária, um maior valor de N_s resultará em menor vazão, pelas mesmas razões expostas para Figura 3.11. Como os valores de P_d, γ_1 e γ_o não influenciam na vazão da rede secundária do novo modelo, os resultados obtidos com o novo e o modelo original são idênticos.

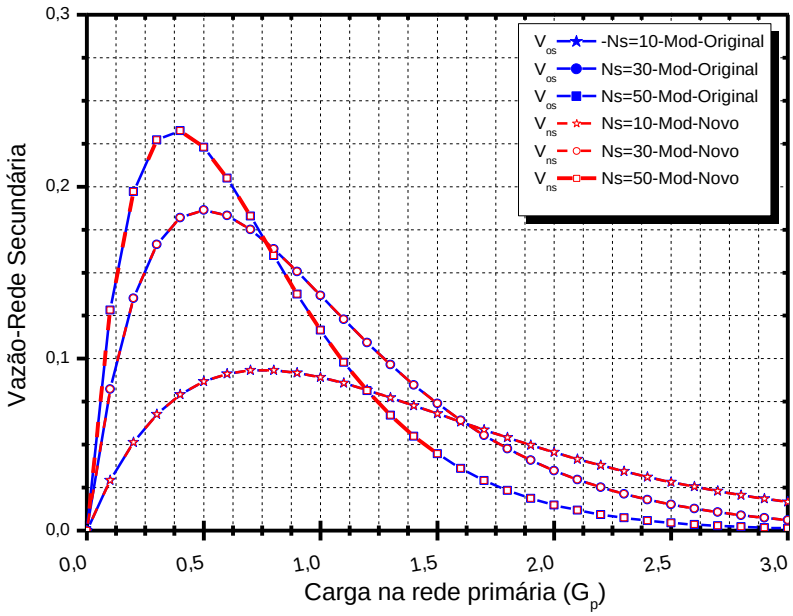


Figura 3.12: *Vazão da rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=30, γ_1=10, R=3dB, P_d=0.9, γ_0= e, m=1).*

A **Figura 3.13** mostra a influência da probabilidade de detecção na vazão da rede global, a qual é a soma das vazões nas redes primária e secundária. À medida em que o valor de P_d cresce, a vazão global cresce principalmente pelo aumento da vazão na rede primária. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

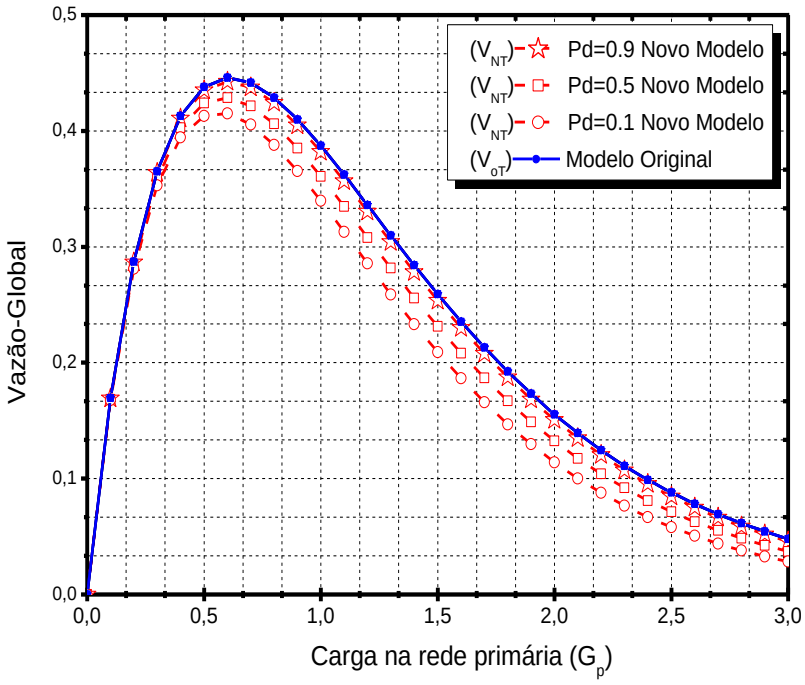


Figura 3.13: *Vazão da rede global: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, γ_0=5 e m=1).*

A **Figura 3.14** apresenta a influência de γ_0 na vazão da rede global, a qual é a soma das vazões nas redes primária e secundária. Verifica-se que este parâmetro tem pouca influência na vazão global da rede. Comparando os modelos, verifica-se que a vazão global do modelo original apresenta um resultado ligeiramente otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

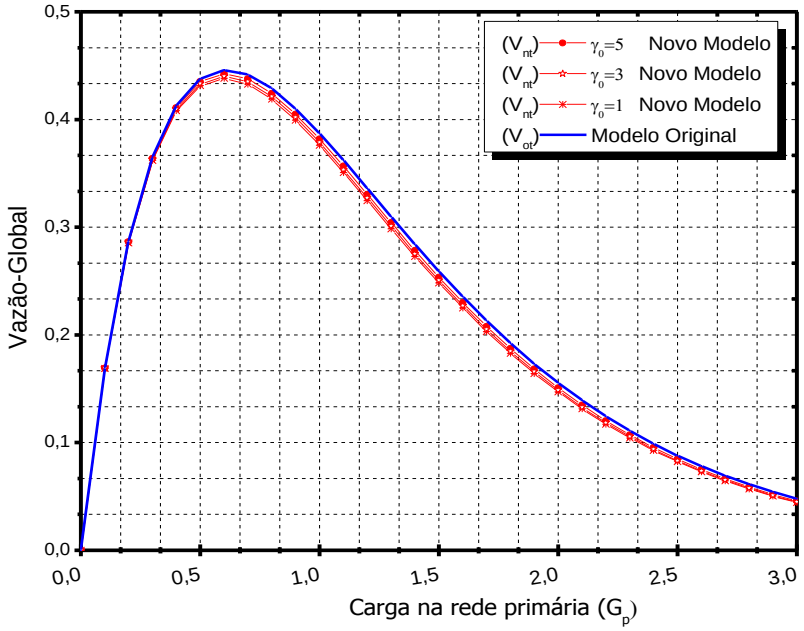


Figura 3.14: *Vazão da rede global: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, m=1 e P_d=0.9).*

A **Figura 3.15** apresenta a influência de γ_1 na vazão da rede global. À medida em que o valor de γ_1 cresce, a vazão global cresce devido ao crescimento da vazão na rede primária. Comparando os modelos, verifica-se que a vazão global do modelo original apresenta um resultado ligeiramente otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

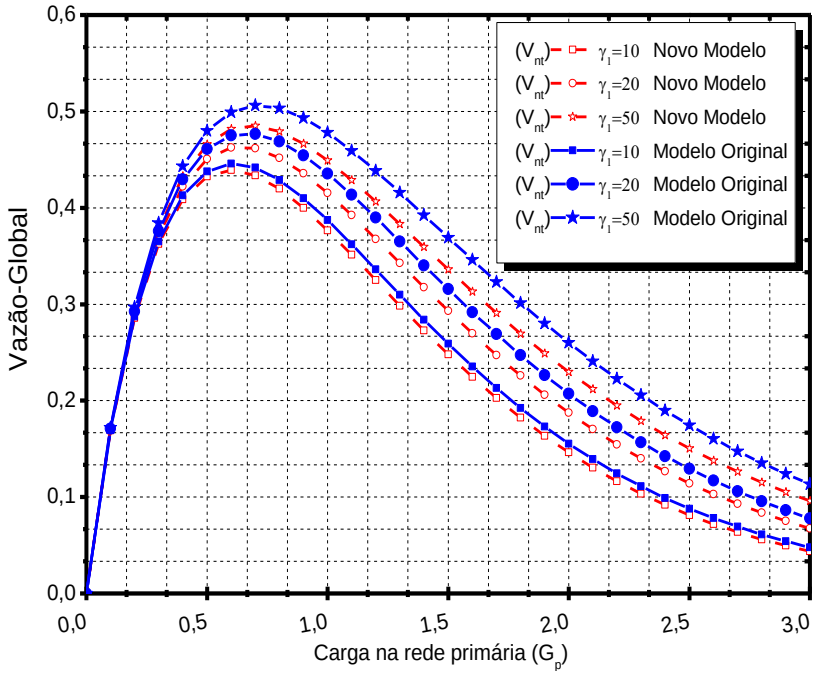


Figura 3.15*: Vazão da rede global: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, R=3dB, P_d=0.9, γ_0=5 e m=1).*

A **Figura 3.16** apresenta a influência da probabilidade de detecção no atraso médio da rede primária. À medida em que o valor de P_d diminui, aumenta o nível de interferência causado pelos USs; consequentemente, a probabilidade de captura pelo PAP cai e o atraso médio na rede primária aumenta. Como forma de reduzir o atraso médio na rede primária é preciso que o valor de P_d seja o mais elevado possível, o que garante menos interferência por parte dos USs na rede primária. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original, apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

Tabela: 3.2 resultados sumarizados em termos da vazão

Figura	*Descrição*	*Resumo*	*Conclusão*
Figura 3.3, Pagina 50.	Influência do parâmetro P_d no cálculo da vazão do novo modelo da rede primária.	À medida que o valor de P_d diminui, a probabilidade de captura pelo PAP diminui devido aos níveis de interferências causadas pelos USs.	Conclui-se que o parâmetro P_d tem impacto significativo no desempenho da rede primária do novo modelo devido aos erros na detecção a respeito do estado do canal. Comparando os modelos original e novo, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação ao novo modelo que considera os erros de detecção na forma de P_d.
Figura 3.4, Pagina 51.	Influência do parâmetro γ_0 no cálculo da vazão do novo modelo da rede primária.	À medida que o valor de γ_0 diminui, a probabilidade de captura pelo PAP também diminui devido aos níveis de interferência causado pelos USs.	Conclui-se que o parâmetro γ_0 tem pouca influência no desempenho da rede primária do novo modelo, pelo fato da razão entre a potência praticada pelo UP ser ligeiramente maior ou igual que aquela praticada pelo US. Comparando os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação ao novo modelo que considera os erros de detecção e diferentes níveis de potência na rede secundária.
Figura 3.5, Pagina 52	Influência do parâmetro γ_1 no cálculo da vazão do modelo original e novo modelo para a rede primária.	À medida que o valor de γ_1 diminui a probabilidade de captura pelo PAP da rede primária do modelo original e novo diminuem devido aos níveis de interferência praticada pelos USs.	Conclui-se que o parâmetro γ_1 tem influência significativa sobre o desempenho do modelo original e novo, pelo fato da razão entre a potência praticada pelo UP ser muito maior que aquela praticada pelo US. Comparando os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação ao novo que considera os erros de detecção.
Figura 3.6, Pagina 53	Influência do parâmetro m no cálculo da vazão do modelo original e novo modelo para a rede primária.	À medida que o valor de m cresce a probabilidade de captura pelo PAP da rede primária do modelo original e do novo modelo diminuem devido a quantidade de USs que tentam transmitir pacotes.	Conclui-se que o parâmetro m tem influência significativa sobre o desempenho do modelo original e novo, à medida que o valor de m cresce. Comparando os modelos, o modelo original apresenta um resultado ligeiramente otimista em relação ao novo modelo.
Figura 3.7, Pagina 53	Influência do parâmetro N_s no cálculo da vazão do modelo original e novo modelo para a rede primária.	À medida que o valor de N_s cresce a probabilidade de captura pelo PAP da rede primária do modelo original e novo modelo diminuem devido os níveis de interferência causados pelos USs.	Conclui-se que o parâmetro N_s tem influência significativa sobre o desempenho do modelo original e novo, à medida que o valor de m cresce N_s. Comparando os modelos, o original apresenta um resultado ligeiramente otimista em relação ao novo modelo.
Figura 3.8, Pagina 54	Influência do parâmetro P_d no cálculo da vazão do modelo novo para a rede secundária.	Quando à transmissão simultânea entre USs e UPs, a probabilidade de captura pelo PAS é próxima de zero para qualquer valor de P_d. No entanto, quando a transmissão ocorre somente pelo USs P_d não influencia na vazão, pois todos os USs utilizam a mesma potência.	Conclui-se que o parâmetro P_d na rede secundária não tem influência no desempenho do novo sistema, pelos mesmos motivos apresentados no resumo desta Figura. Comparando os modelos, o modelo original apresenta resultados semelhantes ao do modelo novo.
Figura 3.9, Pagina 55	Influência do parâmetro γ_0 no cálculo da vazão do novo modelo para a rede secundária.	Quando à transmissão simultânea entre USs e UPs, a probabilidade de captura pelo PAS é próxima de zero para qualquer valor de γ_0. No entanto, quando a transmissão ocorre somente pelo USs o parâmetro γ_0 não influencia na vazão, pois todos os USs utilizam a mesma potência.	Conclui-se que o parâmetro γ_0 na rede secundária não tem influência no desempenho do novo sistema, pelos mesmos motivos apresentados no resumo desta Figura. Comparando os modelos, o modelo original apresenta resultados semelhantes ao do modelo novo.
Figura 3.10, Pagina 56	Influência do parâmetro γ_1 no cálculo da vazão do modelo novo e original para a rede secundária.	Quando à transmissão simultânea entre USs e UPs, a probabilidade de captura pelo PAS é próxima de	Conclui-se que o parâmetro γ_1 na rede secundária não tem influência no desempenho do novo sistema, pelos

		zero para qualquer valores de γ_1. No entanto, quando a transmissão ocorre somente pelo USs o parâmetro γ_1 não influencia na vazão, pois todos os USs utilizam a mesma potência.	mesmos motivos apresentados no resumo desta Figura. Comparando os modelos, o modelo original apresenta resultados semelhantes ao do modelo novo.
Figura 3.11, Pagina 57	Influência do parâmetro m no cálculo da vazão do modelo novo e original para a rede secundária	Para valores pequenos da carga do sistema, à medida que o valor de m cresce o desempenho do sistema também cresce, para valores maiores da carga do sistema, o desempenho da rede diminui, devido o nível de interferência proveniente da rede primária, neste senário o aumento de m aumenta a carga da rede secundária, o que reduz ainda mais o desempenho do sistema.	Pode-se concluir que o parâmetro m tem impacto significativo sobre o desempenho do novo modelo e original, pelo fato do valor de m resultar no aumento da carga da rede secundária. Como os valores de P_d, γ_0 e γ_1 não têm influência sobre o sistema, neste caso, os modelos novo e original apresentam resultados semelhantes.
Figura 3.12, Pagina 58	Influência do parâmetro Ns no cálculo da vazão do novo modelo e modelo original para a rede secundária	Para valores pequenos da carga do sistema, à medida que o valor de Ns cresce o desempenho do sistema também cresce, para valores maiores da carga do sistema, o desempenho da rede diminui devido o nível de interferência proveniente da rede primária, neste senário o aumento de Ns aumenta a carga da rede secundária, o que reduz ainda mais o desempenho do sistema.	Pode-se concluir que o parâmetro N_s tem impacto significativo sobre o desempenho do novo modelo e o modelo original, pelo fato do valor de N_s resultar no aumento da carga da rede secundária. Como os valores de P_d, γ_0 e γ_1 não têm influência sobre o sistema, neste caso, os modelos novo e original apresentam resultados semelhantes.
Figura 3.13, Pagina 59	Influência do parâmetro P_d no cálculo da vazão global do modelo novo	Como a vazão global é a soma das vazões primária e secundária, à medida que o valor de P_d cresce o desempenho da rede global tende a aumentar principalmente pela ocorrência da rede primária.	O vazão global do modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos no novo modelo mais realista por considerar os erros de detecção.
Figura 3.14, Pagina 60	Análise da influência do parâmetro γ_0 no cálculo da vazão global do modelo novo	À medida que o valor de γ_0 diminui na rede global o desempenho do sistema também diminui principalmente pela ocorrência da rede primária.	O Parâmetro γ_0 tem pouca influencia sobre o sistema, a vazão global do modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos no novo modelo mais realista.
Figura 3.15, Pagina 61	Análise da influência do parâmetro γ_1 no cálculo da vazão global do modelo novo e original	À medida que o valor de γ_1 diminui na rede global o desempenho do sistema também diminui principalmente pela ocorrência da rede primária.	O Parâmetro γ_1 tem influencia significativa sobre o sistema, a vazão global do modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos no novo modelo mais realista

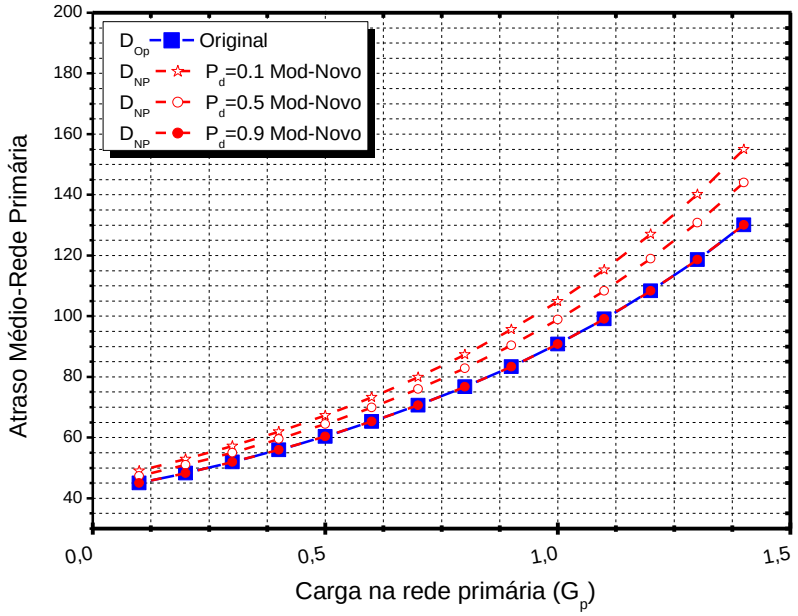


Figura 3.16: *Atraso médio rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3 dB, γ_0=5 e m=1).*

A **Figura 3.17** apresenta a influência de γ_0 no atraso médio da rede primária. À medida em que o valor de γ_0 cresce, o nível de interferência causado pelos USs na rede primária diminui, o que aumenta a probabilidade de captura pelo PAP e diminui o atraso médio na rede primária. Comparando os modelos verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção e diferentes níveis de potência.

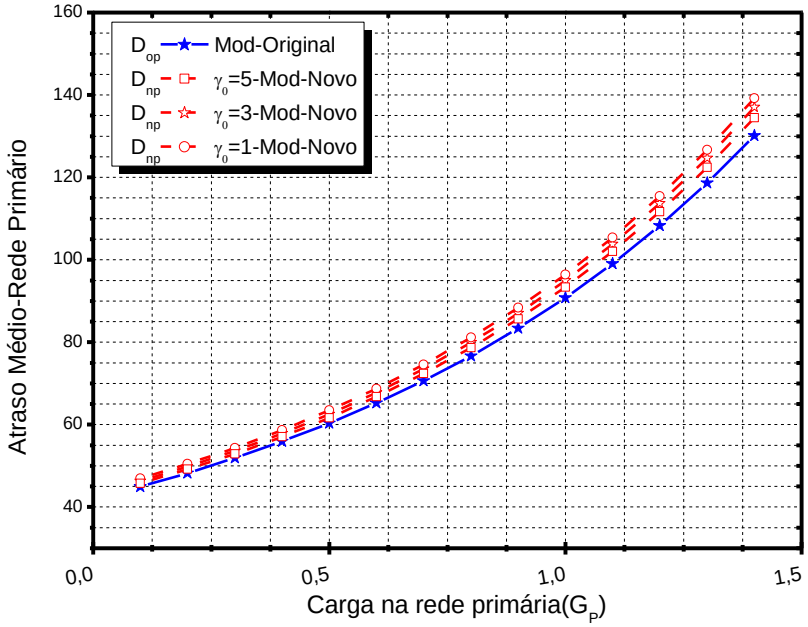


Figura 3.17: *Atraso médio rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, P_d=0.9 e m=1).*

A **Figura 3.18** apresenta a influência de γ_1 no atraso médio da rede primária. À medida em que o valor de γ_1 cresce, o nível de interferência causado pelos USs na rede primária diminui, o que aumenta a probabilidade de captura pelo PAP e reduz o atraso médio na rede primária. Comparando os modelos verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção e diferentes níveis de potência.

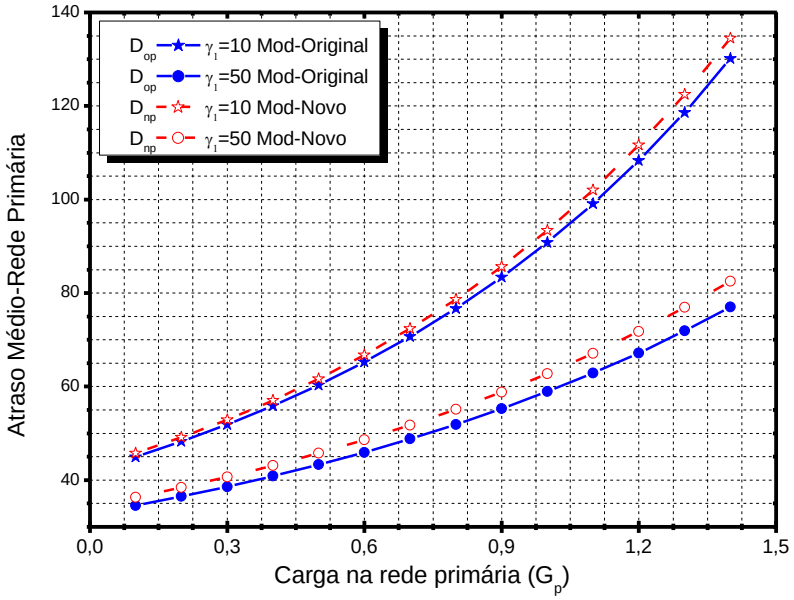


Figura 3.18: *Atraso médio rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, R=3dB, P_d=0.9, γ_0=5 e m=1).*

A **Figura 3.19** apresenta a influência do parâmetro *m* no atraso médio da rede primária. À medida em que o valor de *m* cresce, aumenta a quantidade de USs que tentam transmitir pacotes; consequentemente, cresce o nível de interferência na rede primária e, portanto, o atraso médio na rede de ambos os modelos (original e novo) aumentam. Comparando os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado ligeiramente otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo.

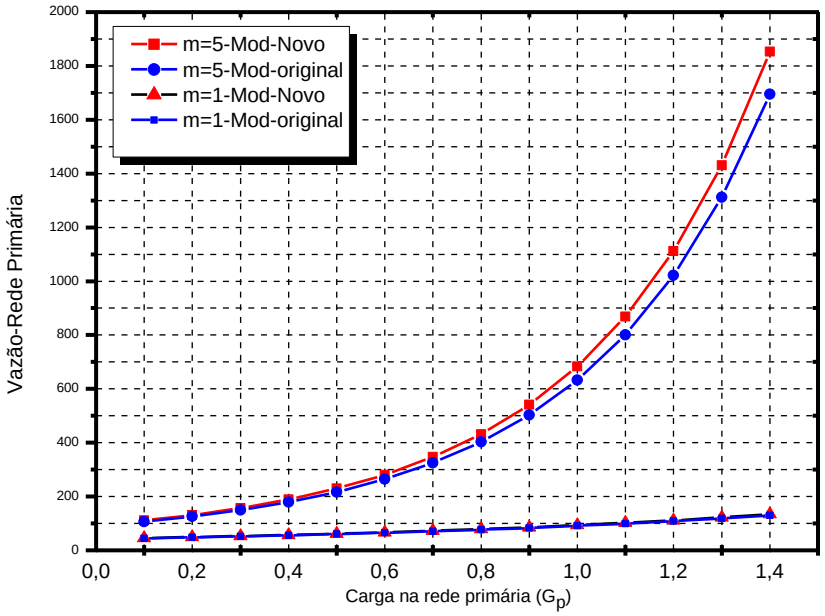


Figura 3.19: *Atraso médio rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, P_d=0.9 e γ_0=5).*

A **Figura 3.20** apresenta a influência da probabilidade de detecção no atraso médio da rede secundária. Percebe-se que o valor de P_d não influencia no atraso médio da rede secundária, por razões semelhantes àquelas expostas para explicar a não influência de P_d na vazão da rede secundária. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que ambos os modelos apresentam resultados semelhantes.

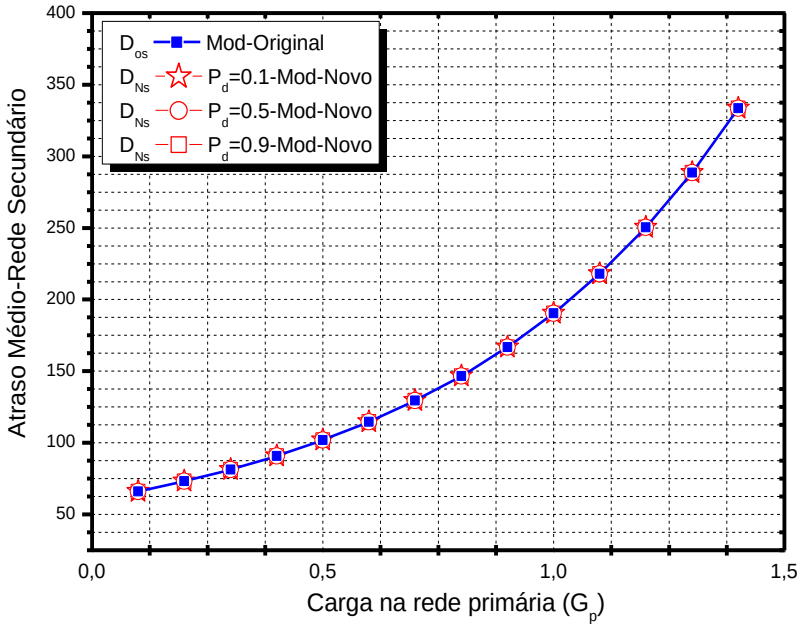


Figura 3.20: *Atraso médio rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, m=1 e γ_0=5).*

A **Figura 3.21** apresenta a influência de γ_0 no atraso médio da rede secundária, para um valor de P_d fixado em 0.9. Observa-se que o valor de γ_0 não influencia no atraso médio da rede secundária e os resultados obtidos com o modelo original e o novo modelo são idênticos. As razões para tal comportamento são semelhantes àquelas utilizadas para explicar a não influência de γ_0 na vazão da rede secundária.

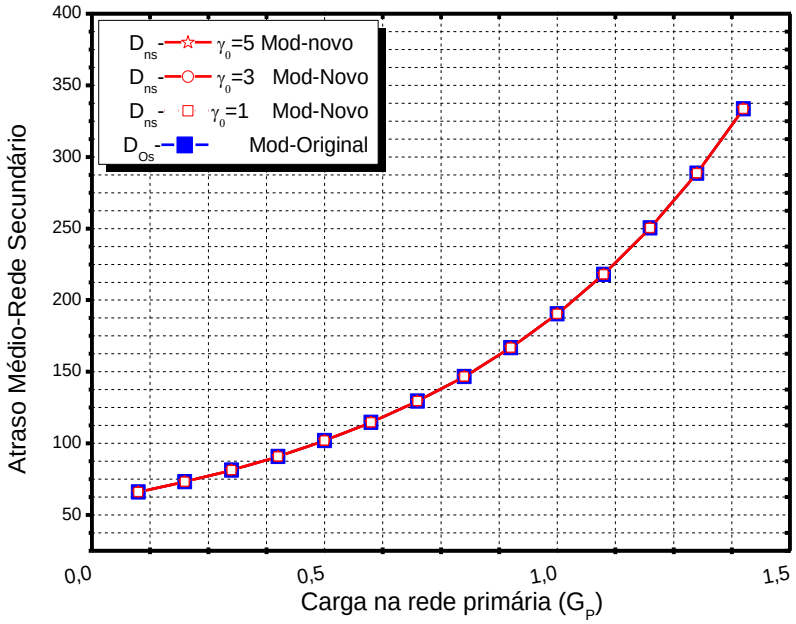


Figura 3.21: *Atraso médio rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, P_d=0.9 e m=1).*

A **Figura 3.22** apresenta a influência de γ_1 no atraso médio da rede secundária, para um valor de P_d fixado em 0.9. Novamente, por razões semelhantes àquelas expostas na discussão sobre a vazão na rede secundária, observa-se que o valor de γ_1 não influencia no atraso médio da rede secundária e os resultados obtidos com o modelo original e o novo modelo são idênticos.

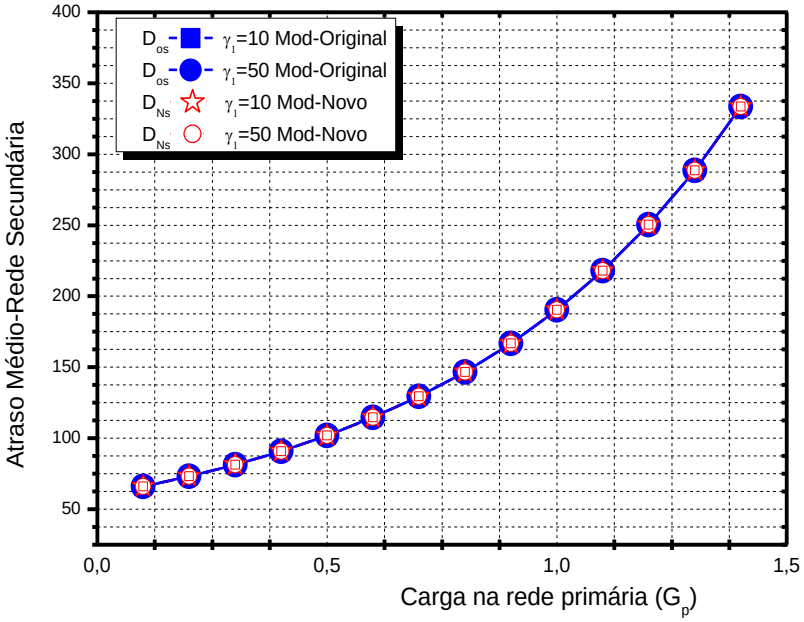


Figura 3.22: *Atraso médio rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_0=5, R=3dB, P_d=0.9 e m=1).*

A **Figura 3.23** apresenta a influência do parâmetro *m* no atraso médio da rede secundária. Observa-se que a partir de um certo valor de carga na rede primária, o atraso médio na rede secundária aumenta com o aumento do valor de *m*.

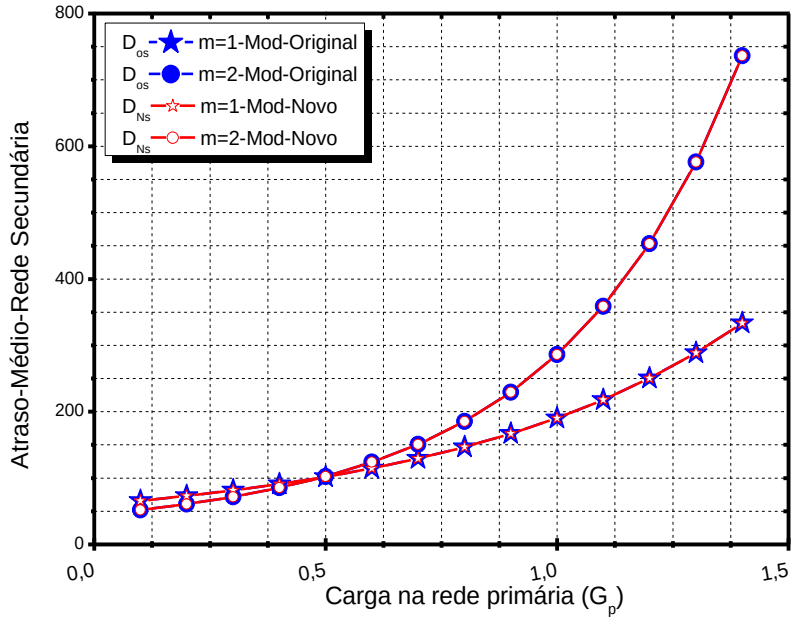


Figura 3.23: *Atraso médio rede secundária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=30, γ_1=10, R=3dB, P_d=0.9 e γ_0=5).*

Tabela:3.3 resultados sumarizados em termos de atraso médio

Figura	*Descrição*	*Resumo*	*Conclusão*
Figura 3.16, Pagina 62.	Influência do parâmetro P_d no cálculo do atraso médio no modelo novo para a rede primária	À medida que o parâmetro P_d diminui o atraso médio da rede primária aumenta, tal efeito ocorre devido aos níveis de interferências causados pelos USs.	Pode-se concluir que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação ao novo modelo que considera os erros de detecção na forma de P_d.
Figura 3.17, Pagina 63.	Influência do parâmetro γ_0, no cálculo do atraso médio no modelo novo para a rede primária	À medida que o parâmetro γ_0 diminui o atraso médio da rede primária aumenta, tal efeito ocorre devido aos níveis de interferências causados pelos USs.	Conclui-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação ao novo modelo que considera os diferentes níveis de potência em função da decisão do estado do canal.
Figura 3.18, Pagina 64.	Influência do parâmetro γ_1, no cálculo do atraso médio no modelo novo e modelo original para a rede primária	À medida que o parâmetro γ_1 diminui o atraso médio da rede primária de ambos modelos cresce, devido aos altos níveis de interferências causados pelos USs.	O modelo original apresenta um resultado otimista em relação ao novo modelo que considera os diferentes níveis de potência em função da decisão do estado do canal.
Figura 3.19, Pagina 65.	Influência do parâmetro m, no cálculo do atraso médio no modelo novo e modelo original para a rede primária.	À medida que o parâmetro m cresce o atraso médio da rede do modelo original e novo crescem, devido a quantidade de USs interferindo na rede primária.	O modelo original apresenta um resultado otimista em relação ao novo modelo que considera os erros de detecção e os diferentes níveis de potência.
Figura 3.20, Pagina 66.	Influência do parâmetro P_d, no cálculo do atraso médio no modelo novo rede secundária	À medida que o valor de P_d diminui o atraso médio da rede quase que não sofre influencia do sistema. Por razões semelhantes àquelas expostas a não influência de P_d	Pode-se concluir, Como o parâmetro P_d não tem influência sobre o sistema, o modelos original e novo apresentam resultados semelhantes.
Figura 3.21, Pagina 67.	Influência do parâmetro γ_0, no cálculo do atraso médio no modelo novo rede secundária	À medida que o valor de γ_0 diminui o atraso médio da rede quase que não sofre influencia do sistema. Por razões semelhantes àquelas expostas a não influência de γ_0.	Como o parâmetro γ_0 não tem influência sobre o sistema, neste caso, o modelo original e o novo modelo apresentam resultados semelhantes.
Figura 3.22, Pagina 68.	Comparação entre os modelos novo e original no cálculo do atraso médio na rede secundária.	À medida que o valor de γ_1 diminui o atraso médio da rede quase que não sofre influencia do sistema. Por razões semelhantes àquelas expostas a não influência de γ_1.	Como o parâmetro γ_1 quase que não tem influencia sobre o sistema, neste caso, o modelo original e o novo modelo apresentam resultados semelhantes.
Figura 3.23, Pagina 69.	Comparação entre os modelos novo e original no cálculo do atraso médio na rede secundária.	A figura mostra a influêcia do parâmetro m, à medida que este cresce o atraso médio da rede do modelo original e novo também crescem, devido ao nível de interferência, principalmente proveniente dos USs.	Como os parâmetros Pd, γ_0 e γ_1 não têm influencia sobre o sistema na rede secundária, neste caso, os resultados do modelo original e novo são semelhantes

3.5 Conclusão

Neste capítulo analisou-se a vazão e o atraso médio de um sistema onde a rede primária e a rede secundária usam o protocolo *Slotted Aloha* para o acesso ao meio.

As análises consideraram um modelo previamente apresentado na literatura [14] que considera o efeito de captura, canal Rayleigh e a influência da PER devido às interferências na rede. Um novo modelo foi proposto, estendendo os resultados apresentados em [14], de modo a considerar o erro de detecção e a possibilidade de utilizar diferentes níveis de potência na rede secundária, em função da decisão sobre o estado do canal.

Os resultados encontrados na rede primária e global do novo modelo mostram uma piora no desempenho das redes, quando se considera P_d e γ_Φ, em relação ao modelo original. Para obter um bom desempenho nestas redes é necessário que o valor de P_d seja o mais elevado possível. Com relação ao atraso médio na rede primária, verifica-se um crescimento à medida em que o valor de P_d diminui. Assim sendo, os efeitos da P_d e γ_Φ não podem ser ignorados nos cálculos, como acontece em [14].

Como estudo futuro, o uso de códigos 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 sensoriamento cooperativo centralizado podem ser analisadas para minimizar os erros na detecção e consequentemente reduzir os níveis de interferências na rede primária causadas pelos USs.

Capítulo: 4 – Análises de desempenho em redes de rádio cognitivo com sensoriamento perfeito e imperfeito usando Slotted Aloha e CSMA

4.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é estudar o desempenho de uma rede de rádios cognitivos em que a rede primária utiliza *Slotted Aloha* e a rede secundária utiliza *Slotted CSMA* como protocolo de acesso ao meio. Assim como ocorreu no Capítulo 3, aqui também é proposto um novo modelo, considerando uma extensão do modelo original, que leva em conta na análise de desempenho o sensoriamento imperfeito. Diferentemente dos modelos estudados e analisados no Capítulo 3, a soma das potências dos sinais interferentes do modelo original neste capítulo tende a ser menor, uma vez que os usuários secundários somente podem transmitir quando o espectro está ocioso. No entanto, no novo modelo aqui proposto, a soma das potências dos sinais interferentes tende a ser maior em relação ao modelo original, devido aos equívocos que podem ocorrer no processo de detecção do canal na rede secundária, resultando em interferência na comunicação do UP.

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; a Seção 4.4 analisa-se o desempenho da rede secundária para o modelo original, em termos de vazão; na Seção 4.5 é mostrada a vazão global das redes conforme o modelo original; na Seção 4.6 é definido o novo modelo; a Seção 4.7 apresenta a detecção do canal do novo modelo; a Seção 4.8 analisa o desempenho da rede primária para o novo modelo; a Seção 4.9 apresenta o cálculo da vazão na rede secundária segundo o novo modelo; a Seção 4.10 mostra o cálculo da vazão global para o novo modelo; a Seção 4.11 apresenta os resultados numéricos para a vazão das redes primária, secundária e global de ambos os modelos; finalizando, a Seção 4.12 apresenta a conclusão do capítulo.

4.2 Modelo original

Nesta seção são investigados os protocolos MAC conhecidos como *slotted aloha* e *CSMA* em uma rede de rádio cognitivo, onde os UPs que pertencem à rede primária têm prioridade em relação aos usuários da rede secundária. Os USs devem monitorar o canal para evitar interferências na comunicação da rede primária. É considerado um canal com desvanecimento Rayleigh, efeito de captura e a PER. É calculada a vazão do *slotted aloha* e *CSMA* nas redes primária e secundária, respectivamente.

A arquitetura para o modelo original é a mesma para o novo modelo proposto, conforme apresentado na Figura 4.1. Ambas as redes possuem pontos de acesso. O UP comunica-se 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 UPs 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 USs, sendo que num determinado *time slot* ocioso da rede primária, há J_s USs ($0 \leq J_s \leq N_s$) tentando transmitir seus pacotes de dados. Todos os USs estão na região de alcance do PAS e vice-versa [13] .

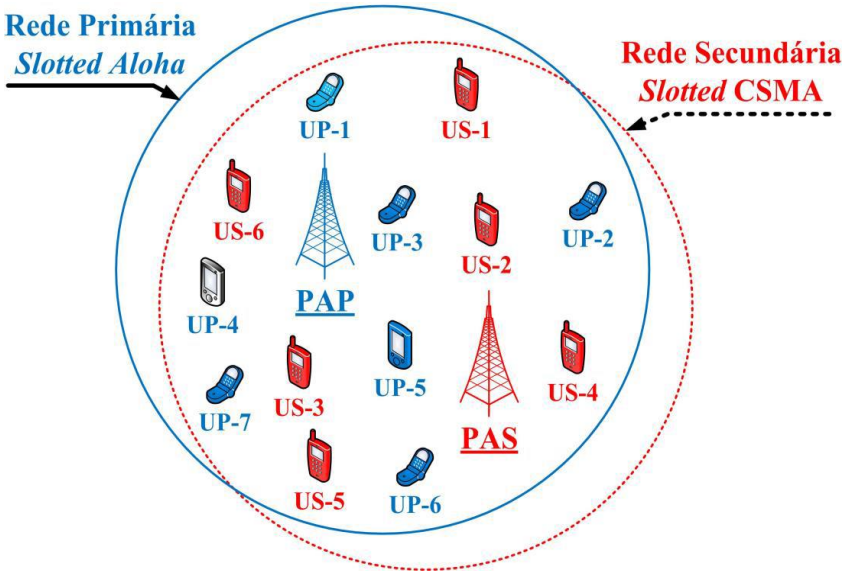


Figura 4.1: *Arquitetura das redes para o modelo original e o proposto*.

A Figura 4.2 mostra a estrutura de *time slots* das redes primária e secundária. Cada *time slot* é classificado como ocupado ou ocioso, dependendo do estado 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 [13].

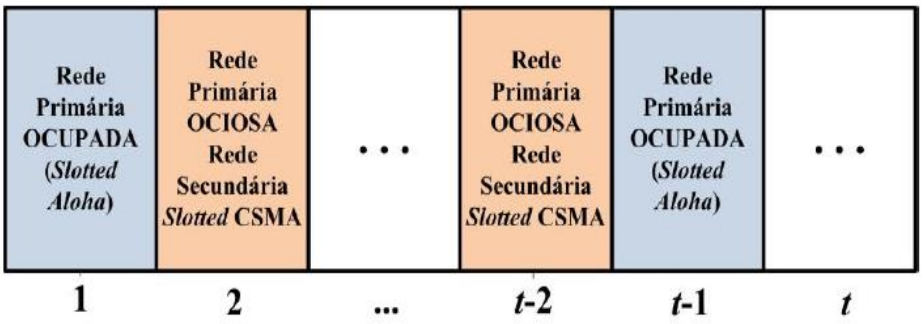


Figura 4.2: *Estrutura de time slot para o modelo original.*

4.2.1 Modelo de tráfego para a rede primária

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 UP tenta transmiti-lo no início do *time slot* seguinte. Se o pacote é transmitido com sucesso, o UP retorna ao estado *thinking*. Caso contrário, passa para o estado *backlogged* [39].

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* [39].

4.3 Análise de desempenho da rede primária para o modelo original

A seguir é calculada a vazão para a rede primária que usa o protocolo *Slotted Aloha*. Neste modelo são considerados os efeitos de captura, o desvanecimento Rayleigh e a PER. Conforme apresentado em [14] [51].

4.3.1 Análise do desvanecimento na rede primária

No modelo de tráfego considera-se um canal com desvanecimento Rayleigh, conforme a função de distribuição de probabilidade apresentada nas Eq.(3.1) e Eq.(3.3) e reproduzidos nas Eq.(4.1) e (4.2) por:

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

$$P_{y_i}(y_i) = \frac{1}{Y} e^{-y_i / Y}. \tag{4.2}$$

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 interferentes nesta rede, X_p e Y são os valores médios das potências dos sinais dos pacotes de interesse e interferente da rede primária. Em [13], é considerado que X_p=Y.

4.3.2 Efeito de captura e probabilidade de captura na rede primária

De maneira similar ao apresentado na Seção 2.5, a probabilidade de captura, $P_{pcap->PAP(Ip),}$ de um sinal de interesse é calculada por:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{pcap}\rightarrow\mathrm{PAP}(I_p)} = \Pr\left(\frac{x_p}{\sum_{i=1}^{I_p - 1} y_i} > R \right). \tag{4.3}$$

Onde I_p é 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 e y_i é o valor da potência instantânea dos sinais dos pacotes interferentes.

Assumindo que todos os UPs são independentes uns dos outros, obtém-se a função densidade de probabilidade conjunta para o sinal de interesse da rede primária em relação à sua interferência conforme apresentado na Eq.(4.4) [13]:

$$f\left(x_p, y_1, \ldots, y_{I_p-1}\right) = \frac{1}{X_p} e^{-\frac{x_p}{X_p}} \prod_{i=1}^{I_p-1} \frac{1}{Y} e^{-\frac{y_i}{Y}} \quad . \tag{4.4}$$

Onde X_p e Y representam as potências médias dos sinais dos pacotes de interesse e interferente, respectivamente. A partir da Eq.(4.3) e da Eq.(4.4) é calculada a probabilidade de captura do pacote de interesse de um UP, como mostra a Eq.(4.5).

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

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.

4.3.3 Cálculo da relação sinal - interferência da rede primária

No modelo de tráfego considerado, quando há atividade na rede primária , os sinais interferentes são causados unicamente pelas transmissões simultâneas dos UPs que estão tentando acessar um *time slot* num dado instante, ou seja, neste caso não há

transmissão dos USs. Assim, a potência média interferente total (P_{ip}) presente na rede primária quando há UPs transmitindo 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, podendo ser calculada por [14]:

$$P_{ip} = \sum_{i=1}^{Ip-1} Y_i. \tag{4.6}$$

Onde I_p é o número de UPs que estão tentando transmitir pacotes num dado *time slot* e Y_i representa a potência média interferente para um UP.

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 apresentado na Eq.(4.7):

$$\Delta_p = \frac{X_p}{P_{ip}} = \frac{X_p}{(I_p - 1)\mathrm{Y}}. \tag{4.7}$$

Em [13], tem-se que X_p=Y_i, logo o valor médio da SIR na rede primária é dado por:

$$\Delta_p = \frac{1}{(I_p - 1)}. \tag{4.8}$$

4.3.4 Taxa média de erro de pacote

As análises realizadas neste trabalho consideram a modulação BPSK coerente sem codificação de canal e que os pacotes da rede primária e secundária têm comprimento de 127 [*bits*]. A probabilidade de erro de pacote (PER) e a probabilidade de sucesso de pacote (PSR) podem ser obtidas de forma aproximada pelas equações (3.21) e (3.22), reproduzidas aqui:

$$P_{ave}(\Delta_p) \leq 1 - \mathrm{e}^{-w_0/\Delta_p}, \tag{4.9}$$

$$PSR(\Delta_p) \geq \mathrm{e}^{-w_0/\Delta_p}. \tag{4.10}$$

4.3.5 Cálculo da vazão da rede primaria do modelo original

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

Na arquitetura da rede apresentada em [14] é considerado dois eventos possíveis quando ocorre um *time slot*.

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

Considerando que as probabilidades de captura, $P_{pcap->PAP(i)}$, para cada um dos *i* usuários desta rede que estão em tentativa de transmissão são iguais e os USs não transmitem seus pacotes quando o UP está em transmissão, a probabilidade condicional do pacote ser recebido corretamente pelo PAP dado que *i* UPs estão tentando transmitir num dado *time slot*, pode ser calculada conforme dado por [14]:

$$Pr\left(E_p|T_i\right) = i.P_{pcap\rightarrow PAP}\left(i\right)PSR(\Delta_p). \tag{4.11}$$

A probabilidade de que *i* UPs transmitam ao mesmo tempo, $P(itx)$, pode ser calculada por:

$$P(itx) = \binom{N_p}{i}\sigma_p{}^i\left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i}. \tag{4.12}$$

Finalmente a vazão da rede primária é dada por:

$$V_{op} = \sum_{i=0}^{N_p}\binom{N_p}{i}\sigma_p{}^i(1-\sigma_p)^{N_p-i}\ \ i\left[\left(\frac{1}{R+1}\right)^{i-1}e^{-w_0(i-1)}\right]. \tag{4.13}$$

4.4 Análise de desempenho da rede secundária para o modelo original

A rede secundária possui N_s USs e durante a ocorrência de um *time slot* detectado como ocioso na rede primária, pode haver J_s USs tentando transmitir seus pacotes de dados. Em [13] [51] assume-se que os usuários secundários podem escutar o canal e determinar se o mesmo está ocupado ou ocioso em um dado instante.

4.4.1 Estrutura de mini- slots

Na rede secundária é usado *Slotted* CSMA como protocolo de acesso ao meio e a estrutura de *mini-slots* para esta rede é ilustrada na Figura 4.3.

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* são detectados como ocupados pelos USs e o segundo e quarto representam oportunidades espectrais que podem ser exploradas pelos USs [13] [51].

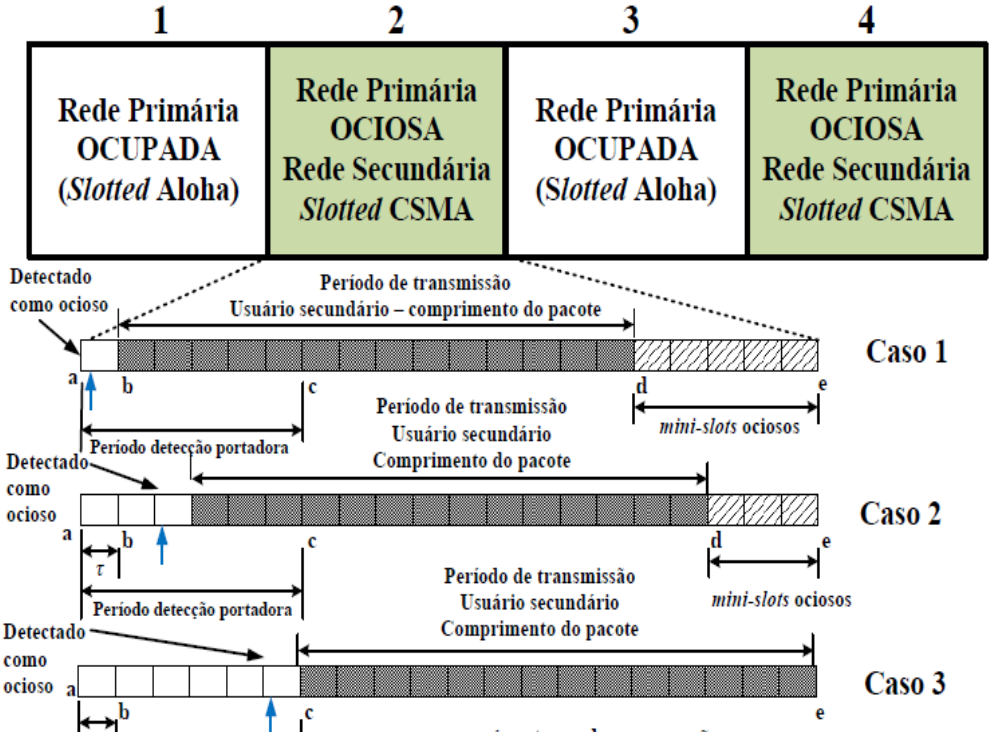


Figura 4.3: *Estrutura de time slot da rede primária e de mini-slots da rede secundária*

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. Eles são denominados de *mini-slots* pois tem uma duração muito menor do que a janela de tempo requerida para transmitir um pacote. Assim sendo, a rede primária é baseada em estrutura de *time slots*, enquanto que a rede secundária é baseada em *mini-slots*.

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 da 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*. Portanto, a duração dos pacotes da rede secundária é menor que aqueles da rede primária, devido ao período necessário para a detecção da portadora pelos USs [13] [51].

4.4.2 Modelo de tráfego para a rede secundaria para o modelo original

A Figura 4.4 ilustra o modelo de tráfego da rede. Nesta rede, cada US pode gerar um novo pacote com probabilidade σ_{mi} durante um *mini-slot*. Logo, a probabilidade de um US não gerar pacote novo em um *mini-slot* é (1-σ_{mi}). Os usuários desta rede que estão em estado de *backlogged* ou em estado de retransmissão não podem gerar pacotes novos [13].

Quando ocorre um *time slot* na rede primária e um US gera um novo pacote durante um *mini-slot* pertencente ao período de detecção da portadora, esse usuário monitora o canal no começo do próximo ponto de detecção da portadora que ocorre no início do próximo *mini-slot* do período de detecção da 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 da 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 [13] [51].

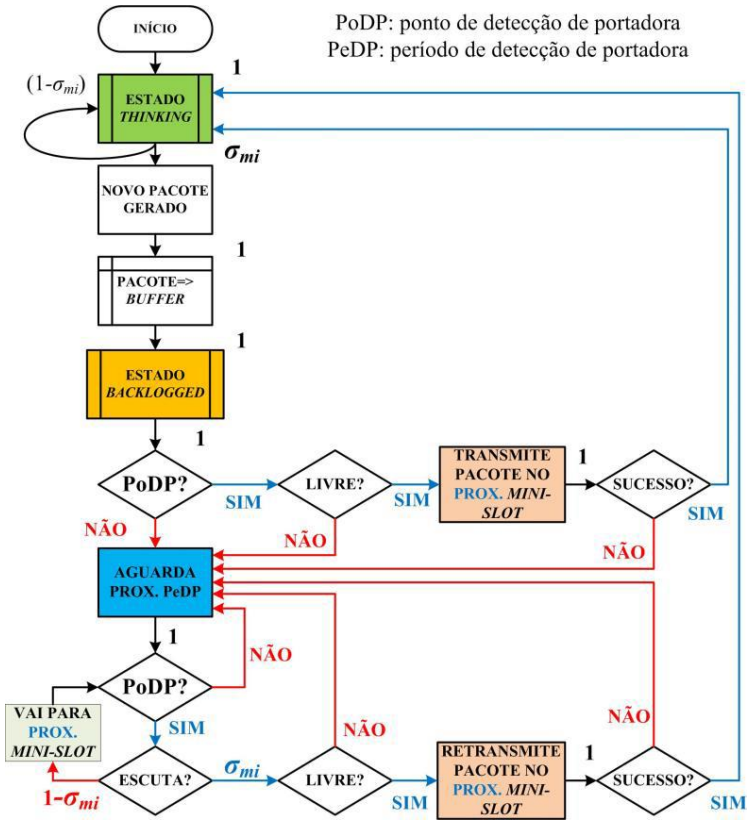


Figura 4. 4: *Modelo de tráfego para a rede secundária com Slotted CSMA*

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.

Assume-se que os USs 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 USs em um ambiente de cooperação e competição entre eles.

4.4.3 Modelo de desvanecimento da rede secundária para o modelo original

Considera-se um canal com desvanecimento segundo a distribuição de Rayleigh, conforme apresentado na Eq.(3.2) e Eq.(3.4) da Seção 3.2.3 e reproduzido aqui:

$$P_x(x_s) = \frac{1}{X_s} e^{-x_s / X_s}, \tag{4.14}$$

$$P_{z_j}(z_j) = \frac{1}{Z} e^{-z_j / Z}. \tag{4.15}$$

Onde x_S é a potência instantânea do pacote de interesse, z_j a potência instantânea do pacote interferente, X_S e Z representam o valor médio da potência dos pacotes de interesse e interferente, respectivamente. Em [13] é considerado que X_S=Z.

4.4.4 Efeito de captura na rede secundária

Assim como ocorre para o caso da rede primária, aqui é analisado o desempenho da rede secundária considerando o efeito de captura. Assume-se que um US que tem pacote para transmitir, primeiro escuta o meio dentro do período de detecção de portadora e transmite se somente o canal estiver livre.

A probabilidade de captura do pacote de interesse pelo PAS, $P_{scap->PAS}(J_s)$, pode ser calculada por [13]:

$$P_{\text{scap}\rightarrow\text{PAPS}}(J_s) = \left(\frac{x_s}{\sum_{j=1}^{J_s-1} z_j} > R \right). \tag{4.16}$$

Onde x_s representa a potência instantânea do pacote de interesse nesta rede, z_j é a potência instantânea interferente, J_s representa o número de USs que estão tentando transmitir pacotes durante uma oportunidade espectral e R é a razão de captura.

Considerando que todos os USs da rede secundária são independentes entre si, a função densidade de probabilidade conjunta para o sinal do pacote de interesse e os sinais dos pacotes interferentes, pode ser apresentada por [13]:

$$f\left(x_s, z_1, \ldots, z_{J_s-1}\right) = \frac{1}{X_s} e^{-\frac{x_s}{X_s}} \prod_{j=1}^{J_s-1} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_j}{Z}}. \tag{4.17}$$

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

A partir da Eq.(4.16) e da Eq.(4.17), pode-se calcular a probabilidade de captura de um pacote de interesse na rede secundária, dado por [13]:

$$\begin{aligned} P_{scap\to PAS}(J_s) = \Pr\left(\frac{X_s}{\sum_{j=1}^{J_s-1} z_j} > R\right) &= \int_0^\infty \ldots \int_0^\infty \int_{R\left(\sum_{j=1}^{J_s-1} z_j\right)}^\infty \frac{1}{X_s} e^{-\frac{x_s}{X_s}} \\ &\prod_{j=1}^{Js-1} \frac{1}{Z} e^{-\frac{z_j}{Z}} dx_s\, dz_1 \ldots dz_{J_s-1} \\ &= \left(\frac{X_s}{RZ + X_s}\right)^{J_s-1} = \left(\frac{1}{R+1}\right)^{J_s-1}. \end{aligned} \tag{4.18}$$

Onde x_s e z_j são os valores instantâneos dos sinais dos pacotes de interesse e interferente, respectivamente, X_s e Z 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 pacotes durante uma oportunidade espectral.

Observando a Eq.(4.18), 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 pacotes de dados.

4.4.5 Cálculo da relação sinal-interferência na rede secundária

No modelo de tráfego considerado, os USs podem escutar o canal e determinar se um *time slot* da rede primária está ocioso ou não. Quando um *time slot* da rede primária é detectado ocioso, os USs que possuem pacotes para transmitir aproveitam esta oportunidade espectral. Neste contexto os sinais interferentes da rede secundária é exclusivamente o número de USs que estão em tentativa de transmissão em um dado *mini slot.*

A potência média interferente total da rede secundária, P_{is}, é calculada por[14]:

$$P_{is} = \left(J_s - 1\right) Z_j . \tag{4.19}$$

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

Na rede secundária, o valor médio da SIR, Δ_s, pode ser calculada através da relação entre a potência média do sinal do pacote de interesse, X_s, e a potência média interferente total, P_{is}, conforme apresentado por:

$$\Delta_s = \frac{X_s}{P_{is}} = \frac{X_s}{\left(J_s - 1\right) Z_j} . \tag{4.20}$$

Lembrando que X_s=Z_j, então a SIR média da rede secundária é igual a:

$$\Delta_s = \frac{1}{\left(J_s - 1\right)} . \tag{4.21}$$

4.4.6 Taxa média de erros de pacotes

A probabilidade de erro de pacote (PER) e a probabilidade de sucesso de pacote (PSR) podem ser obtidas de forma aproximada pelas Eq.(4.22) e (4.23):

$$P_{ave}(\Delta_s) \leq 1 - e^{-w_0/\Delta_s}, \quad (4.22)$$

$$PSR(\Delta_s) \geq e^{-w_0/\Delta_s}. \quad (4.23)$$

4.4.7 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, considerando ainda o efeito da PER devido às interferências das estações desta rede [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. Dado que existe 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 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 detectar um *mini-slot* livre dentro do período de detecção de portadora da rede secundária. 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 *Es*: o PAS recebe com sucesso um pacote gerado por um US, durante um *time slot* ocioso, isto é, sem transmissões de UPs.

- Evento *Tj*: em um dado *time slot* ocioso há *j* usuários tentando transmitir um pacote de dados para o PAS.

Considerando que as probabilidades de captura, $P_{scap->PAS(j),}$ para cada um dos *j* 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, a probabilidade condicional de que um pacote seja capturado pelo PAS, dado que *j* USs estão tentando transmitir pacotes em um *time slot* ocioso, pode ser calculada por [14]:

$$Pr\left(E_S|T_j\right) = jP_{scap\rightarrow PAS}\left(j\right)PSR(\Delta_s). \tag{4.24}$$

A probabilidade de que *j* US transmitam ao mesmo tempo, *P*(*jtx*), é dada por:

$$P(jtx) = \binom{N_s}{j}\sigma_{mi}{}^{j}\left(1-\sigma_{mi}\right)^{N_s-j}. \tag{4.25}$$

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* executar a retransmissão de um pacote e *j* é o número de USs que estão disputando um *time slot* ocioso.

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* usuários tentando transmitir simultaneamente seus pacotes para as várias combinações de estações transmissoras possíveis, tem-se [14]:

$$P_s = \sum_{j=0}^{N_s}\binom{N_s}{j}\sigma_{mi}{}^{j}\left(1-\sigma_{mi}\right)^{N_s-j}\left(\frac{1}{R+1}\right)^{j-1}\ \mathrm{e}^{-w_0(j-1)}. \tag{4.26}$$

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:

$$P_{mi_idle}(1) = \left(1-\sigma_{mi}\right)^{N_s}. \tag{4.27}$$

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

$$P_{mi_idle}\left(S_{mi}-1\right) = \left(\left(1-\sigma_{mi}\right)^{N_s}\right)^{S_{mi}-1}. \tag{4.28}$$

Seja a Figura 4.5 mostrada a seguir, que leva em conta a ocorrência de um *time slot* ocioso [13]. No primeiro caso, *j* estações detectam o meio livre no primeiro *mini-slot* do período de detecção da portadora e iniciam a transmissão de pacotes no *mini-slot* seguinte. A probabilidade de sucesso nesse caso é dada pela Eq.(4.26). No segundo caso, no primeiro *mini-slot* nenhuma estação tenta transmitir, porém, no segundo *mini-slot*, *j* usuários tentam. Nesse caso, a probabilidade de que o pacote de interesse seja capturado é dada por:

$$P_{cap}(L=2) = \left(1-\sigma_{mi}\right)^{N_s} P_s. \tag{4.29}$$

Onde L indica em qual *mini-slot* houve escuta do canal de transmissão, σ_{mi} é a probabilidade de uma estação gerar um novo pacote, N_s é o número total de USs da rede secundária e P_s é a probabilidade de sucesso.

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 na Figura 4.5, tem-se:

$$P_{cap}(L=S_{mi}) = \left[\left(1-\sigma_{mi}\right)^{N_s}\right]^{S_{mi}-1} P_s. \tag{4.30}$$

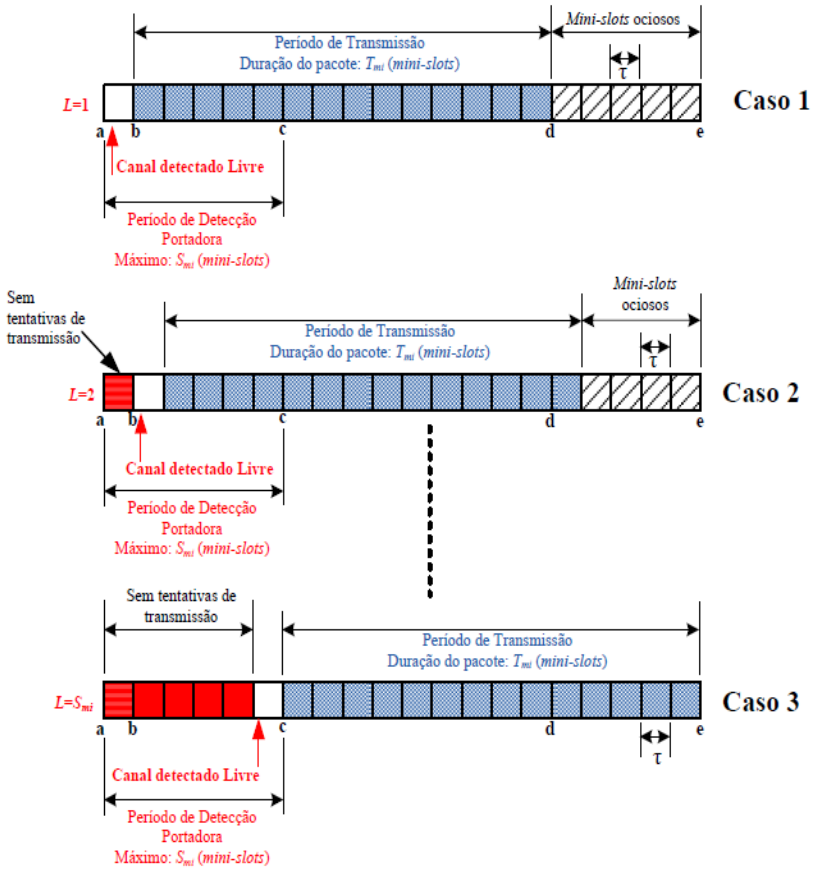


Figura 4.5: *Estudo de casos de uso e detecção de mini-slots livres na rede secundária*

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,..., S_{mi},

$$P_{suc} = \sum_{s=1}^{S_{mi}} \left[\left(1 - \sigma_{mi}\right)^{N_s} \right]^{s-1} P_s. \tag{4.31}$$

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

$$P_{idle}(1) = \left(1 - \sigma_p\right)^{N_p}. \tag{4.32}$$

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 de um *time slot*, L_{mi}, é igual a:

$$L_{mi} = S_{mi} + T_{mi}. \tag{4.33}$$

De acordo com [13] e [14], quando um US detecta o canal livre, ele inicia a transmissão do pacote gerado imediatamente. Se o ponto de detecção do 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:

$$U_{mi} = \frac{T_{mi}}{L_{mi}} = \frac{T_{mi}}{T_{mi} + S_{mi}}. \tag{4.34}$$

Finalmente, a vazão da rede secundária, V_{os}, é dada por [14] [51]:

$$V_{os} = \frac{\left(1-\sigma_p\right)^{N_p} T_{mi}}{T_{mi} + S_{mi}} \sum_{s=1}^{S_{mi}} \left[\left(1-\sigma_{mi}\right)^{N_s} \right]^{s-1} \sum_{j=0}^{N_s} j \left[\begin{pmatrix} N_s \\ j \end{pmatrix} {\sigma_{mi}}^{j} \left(1-\sigma_{mi}\right)^{N_s - j} \left(\frac{1}{R+1} \right)^{j-1} \mathrm{e}^{-w_0/\Delta} \right]. \tag{4.35}$$

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.

4.5 Cálculo da vazão global para o modelo original

A vazão global do sistema do modelo original é a soma das vazões obtidas para cada rede primária e secundária conforme apresentado por:

$$V_{ot} = V_{op} + V_{os}. \tag{4.36}$$

Onde, V_{op} é a vazão da rede primária e V_{os} é a vazão da rede secundária, ambas considerando o modelo original apresentado em [14]. Estas vazões podem ser obtidas por meio da Eq.(4.13) e da Eq.(4.35), respectivamente.

4.6 Novo modelo do sistema

Nos cálculos das vazões do modelo original são considerados o efeito de captura, o desvanecimento do canal e a PER. Nesta Seção apresenta-se uma extensão de tal modelo, levando em conta na análise de desempenho o sensoriamento imperfeito, efeito este não considerado no modelo original.

No modelo original, quando há atividade na rede primária ou secundária, os sinais interferentes são causados unicamente pelas transmissões simultâneas das estações daquela rede. Entretanto, no novo modelo, que considera o sensoriamento imperfeito, os sinais interferentes podem ser causados pelas estações primárias e secundárias sempre que o PAS e US erram na detecção a respeito da presença do UP no canal. Tal efeito é contabilizado nos cálculos das vazões das redes primária, secundária e global do novo modelo.

4.7 Sensoriamento do canal do novo modelo

No novo modelo apresentado neste capítulo, no inicio de um *time slot* o PAS sente o canal e decide se o mesmo está livre ou ocupado pelo UP. Se a decisão é dada como ocupada, o US com pacote não pode utilizar o canal. Portanto, armazena seu pacote em um *buffer*. Se a decisão a respeito do estado do canal pelo PAS é dada como livre, o US tem permissão para sentir o canal no próximo ponto de detecção dentro do período de detecção da portadora e decidir se o canal está livre ou ocupado por algum

usuário (primário ou secundário). Se a decisão sobre o estado do canal é livre, o pacote é transmitido imediatamente. Caso contrário, e também na situação em que um US gera pacote fora do período de detecção da portadora, o pacote é armazenado em um *buffer*. Nestas condições, o US aguarda o PAS decidir o estado do canal como livre no início de um dado *time slot*, para ter acesso ao canal. Se a decisão a respeito do canal é dado como ocupado pelo US, o processo repete-se nos próximos *time slots* até o pacote ser transmitido com sucesso.

Quando o estado real do canal é ocupado, definem-se P_{dPAS} e P_{dUS} como as probabilidades de detecção sobre o canal (decisão pelo canal ocupado quando de fato o canal esta ocupado), respectivamente para o PAS e o US. Se o estado real do canal é livre, definem-se P_{fPAS} e P_{fUS} como as probabilidades de falso alarme sobre o canal (decisão pelo canal ocupado quando na verdade o canal esta livre), respectivamente para o PAS e o US.

4.8 Descrição do modelo de tráfego rede secundária utilizando o protocolo CSMA

Na rede secundária o US pode gerar um novo pacote com probabilidade σ_{mi} durante um *mini-slot*. Logo, a probabilidade de que um US não gere um novo pacote 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 novos pacotes.

A rede primária possui N_p UPs, 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 o *Slotted - Aloha*. A rede secundária possui N_s USs e durante um *time slot* pode haver J_s *USs* $(0 \leq J_s \leq N_s)$ tentando transmitir seus pacotes. O protocolo MAC usado na rede secundária é *Slotted CSMA.* A estrutura da rede é baseada em dois conjuntos de *mini slots,*onde uma parcela é destinada ao período de detecção da portadora representado por S_{mi} e a outra parcela é destinada para transmissão dos pacotes de dados, representado por T_{mi}, conforme ilustra a Figura 4.5.

A probabilidade de J_s USs estarem em tentativa de transmissão em um *time slot* é calculada para duas hipóteses do estado real do canal: canal ocupado pelo UP ou canal livre da presença do UP.

Se o estado real do canal é ocupado pelo UP, o PAS no inicio de um *time slot* sente o canal e decide se o mesmo está livre ou ocupado. Se o US tem pacote para transmitir em um *mini slot* ele consulta a decisão do PAS, se a decisão for que o canal está livre, o que corre com probabilidade ($1-P_{dPAS}$), o US tem permissão para detectar o canal no inicio do próximo ponto de detecção dentro do período de detecção da portadora, se o canal é detectado como livre, o que ocorre com probabilidade ($1-P_{dUS}$), o pacote é transmitido imediatamente. Caso contrário, se o US detecta o canal como ocupado, o que ocorre com probabilidade (P_{dUS}), ou na situação em que o US gera pacote fora do período de detecção da portadora, este desiste de transmitir no *time slot* em análise e tenta nos *time slots* seguintes, até o pacote ser transmitido com sucesso. Ainda na situação em que o UP está em transmissão no canal, agora considerando que o PAS detecta o canal como ocupado, o que ocorre com probabilidade (P_{dPAS}), o US que gera pacote, dentro ou fora do período de detecção da portadora, não terá permissão para usar o canal e tentará novamente no próximo *slot*.

Se o estado real do canal é livre da presença do UP, o PAS no inicio de um *time slot* sente o canal e decide se o mesmo está livre ou ocupado. Se o US tem pacote para transmitir em um *mini slot* ele consulta a decisão do PAS. Se a decisão for que o canal está livre, o que corre com probabilidade ($1-P_{fPAS}$), o *slot* poderá ser utilizado pelo US.

Para a situação do estado real do canal livre, o primeiro *mini slot* de um *slot* certamente estará livre. Assim, a US que desejar transmitir neste *mini slot* o fará com probabilidade ($1-P_{fUS}$) e não transmitirá com probabilidade (P_{fUS}) e tentará novamente no *time slot* seguinte.

A partir do segundo *mini slot* o resultado do processo de detecção por parte das USs depende se algum US iniciou transmissão nos *mini slots* anteriores ou não. Se nenhuma US iniciou transmissão nos *mini slots* anteriores, uma US que deseja transmitir no *mini slot* corrente o fará com probabilidade ($1-P_{fPAS}$). No entanto, se alguma US iniciou transmissão nos *mini slots* anteriores o canal já está ocupado e, portanto, uma US que desejar transmitir só o fará se errar o processo de detecção, o que ocorre com probabilidade ($1-P_{dUS}$).

Ainda na situação em que o UP está ausente no canal, agora considerando que o PAS decide o canal como ocupado o que ocorre com probabilidade (P_{fPAS}), o US não poderá utilizar o canal, portanto, tenta a sua transmissão nos *times slots* seguintes até o sucesso.

Em qualquer caso, um pacote gerado por um US fora do período de detecção de portadora só poderá ser transmitido no *time slot* seguinte

4.9 Análise de desempenho da rede primária para o modelo novo

No novo sistema a rede primária segue o modelo de tráfego apresentado na Seção 3.2.2. Na rede secundária cada US pode gerar um novo pacote com probabilidade σ_{mi} durante um *mini-slot*. Logo, a probabilidade de que um US não gera novo pacote em um *mini-slot* é (1-σ_{mi}). Os usuários desta rede que estão em estado de *backlogged* ou em estado de retransmissão não podem gerar novos pacotes.

A rede primária possui N_p UPs, 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 USs, durante a ocorrência de um *time slot* na rede primária, pode haver J_s *USs* ($0 \leq J_s \leq N_s$) tentando transmitir seus pacotes . O protocolo MAC usado na rede secundária é *Slotted CSMA.* A estrutura da rede é baseada em dois conjuntos de *mini slots*, S_{mi} e T_{mi}, conforme apresentado na Seção 4.4.1.

4.9.1 Probabilidade de o usuário secundário tentar transmitir em um time slot ocupado pelo usuário primário

A probabilidade de J_s USs estarem em tentativa de transmissão em um *time slot* ocupado pelo UP, representado por ($P_{tx\text{-}ocupado}(J_s)$), é calculada com base na hipótese de que o PAS e os USs erraram na decisão a respeito do estado do canal. Esta probabilidade é calculada pela Eq.(4.37):

$$P_{tx-ocupado}(J_s) = (1-P_{dPAS}) \sum_{x_0=0}^{B_0=N_s} \sum_{j_0=C_0}^{D_0} \sum_{x_1=A_1}^{B_1} \sum_{j_1=C_1}^{D_1} \cdots \sum_{x_{s_{mi-1}}=A_{s_{mi-1}}}^{B_{s_{mi-1}}} \sum_{j_{s_{mi-1}}=C_{s_{mi-1}}}^{D_{s_{mi-1}}} \sum_{x_{s_{mi}}=A_{s_{mi}}}^{B_{s_{mi}}}$$
$$\left(\left(\binom{B_0}{x_0} \sigma_{mi}^{\,x_0} (1-\sigma_{mi})^{B_0-x_0}\right)\left(\binom{x_0}{j_0}(1-P_{dUS})^{j_0}(P_{dUS})^{x_0-j_0}\right)\right)$$
$$\left(\left(\binom{B_1}{x_1} \sigma_{mi}^{\,x_1} (1-\sigma_{mi})^{B_1-x_1}\right)\left(\binom{x_1}{j_1}(1-P_{dUS})^{j_1}(P_{dUS})^{x_1-j_1}\right)\right)\cdots$$
$$\left(\left(\binom{B_{s_{mi}-1}}{x_{s_{mi}-1}} \sigma_{mi}^{\,x_{s_{mi}-1}} (1-\sigma_{mi})^{B_{s_{mi}-1}-x_{s_{mi}-1}}\right)\left(\binom{x_{s_{mi}-1}}{j_{s_{mi-1}}}(1-P_{dUS})^{j_{s_{mi-1}}}(P_{dUS})^{x_{s_{mi}-1}-j_{s_{mi-1}}}\right)\right)$$
$$\left(\left(\binom{B_{s_{mi}}}{x_{s_{mi}}} \sigma_{mi}^{\,x_{s_{mi}}} (1-\sigma_{mi})^{B_{s_{mi}}-x_{s_{mi}}}\right)\left(\binom{x_{s_{mi}}}{j_{s_{mi}}}\left((1-P_{dUS})^{j_{s_{mi}}}\right)(P_{dUS})^{x_{s_{mi}}-j_{s_{mi}}}\right)\right). \quad (4.37)$$

Na expressão (4.37), S_{mi} denota o número de *mini slots* que compõem o período de detecção de portadora, numerados de 0 a S_{mi-1}. O número de estações que detectarão a portadora no inicio do *mini slot i* é igual ao número de estações que geraram pacotes durante o *mini slot i-1*. As estações que geraram pacotes no *mini slot* S_{mi-1} irão detectar a portadora no inicio do *mini slot* S_{mi}, que já pertence ao período de transmissão.

Ainda na expressão (4.37), B_i (i=0,1,2...,S_{mi}) denota o número máximo de estações que podem gerar pacotes a serem transmitidos a partir do *mini slot i;* x_i (i=0,1,2...,S_{mi}) denota o número de estações que efetivamente geraram pacotes a serem transmitidos a partir do *mini slot i* ; j_i (i=0,1,2...,S_{mi}) denota o número de estações que erraram a detecção e efetivamente transmitiram a partir do *mini slot i.* Os demais parâmetros que definem os limitantes dos somatórios são definidos na Tabela (4.1). Para validar a Eq.(4.37) comparou-se os resultados obtidos com a equação com os resultados obtidos por meio de uma simulação de Monte Carlo.

Para o desenvolvimento da simulação de Monte Carlos, cujos resultados são apresentados na Figura (4.6), foram considerados 100.000 *time slots*, em que cada um destes possui quatro *mini slots*. Na rede secundária, considerou-se o número de estações igual a 10, logo a quantidade de USs que podem gerar e transmitir pacotes em um *time slot* deve estar entre 0 e 10. Para cada *mini slot* é criado inicialmente um vetor com número de posições em função da quantidade de USs que podem gerar pacote. O US na sua posição gera um valor aleatório, se este valor for menor ou igual a σ

considera-se que o US gerou pacote, neste caso, o US não poderá gerar novo pacote nos próximos *mini slots* do *time slot* em análise. Caso contrário, se o valor for maior que σ, considera-se que o US não gerou pacote, neste contexto, o US tentará gerar pacote nos *mini slots* seguintes.

Em cada *mini slot* após o US gerar pacote é criado um segundo vetor com o número de posições em função da quantidade de USs que geraram pacotes. Na situação em que o estado real do canal é ocupado pelo UP, P_d é utilizado como parâmetro de decisão para determinar se o US está ou não em transmissão no canal. O US na sua posição gera um valor aleatório, se este valor for menor ou igual que P_d significa que o US detectou o canal como ocupado e, portanto, desiste de transmitir no *time slot* em análise. Caso contrário, se a decisão é dada como livre, o US inicia imediatamente a sua transmissão.

A probabilidade de uma certa quantidade de USs estarem em tentativa de transmissão na rede secundária é dada pela razão entre o número de *time slots* em termos de USs que estão efetivamente em tentativa de transmissão, representado por (J_s), dividido pelo número total de *time slots* considerado na análise deste experimento.

Considerando a situação em que o estado real do canal é livre da presença do UP, conforme apresentado nas Figuras (4.7) e (4.8). Se o estado real do canal é livre, P_f é utilizado como parâmetro de decisão para determinar se o US está ou não em transmissão no canal. O US na sua posição gera um valor aleatório, se o valor for menor ou igual a P_f significa que o US detectou o canal como ocupado, portanto, desiste de transmitir no *time slot* em análise. Caso contrário, se a decisão é dada como livre, o US imediatamente transmite o seu pacote. Na situação em que um US iniciou a sua transmissão em um *mini slot* anterior ao de análise, neste caso, o parâmetro de decisão que determina se o US está ou não em transmissão no canal passará a ser novamente P_d.

Novamente, o cálculo da probabilidade de uma certa quantidade de USs estarem em tentativa de transmissão na rede secundária é dado pela razão entre o número de *time slots* em termos de USs que estão efetivamente em tentativa de

transmissão, representado por (J_s), dividido pelo número total de *time slots* considerado na análise deste experimento.

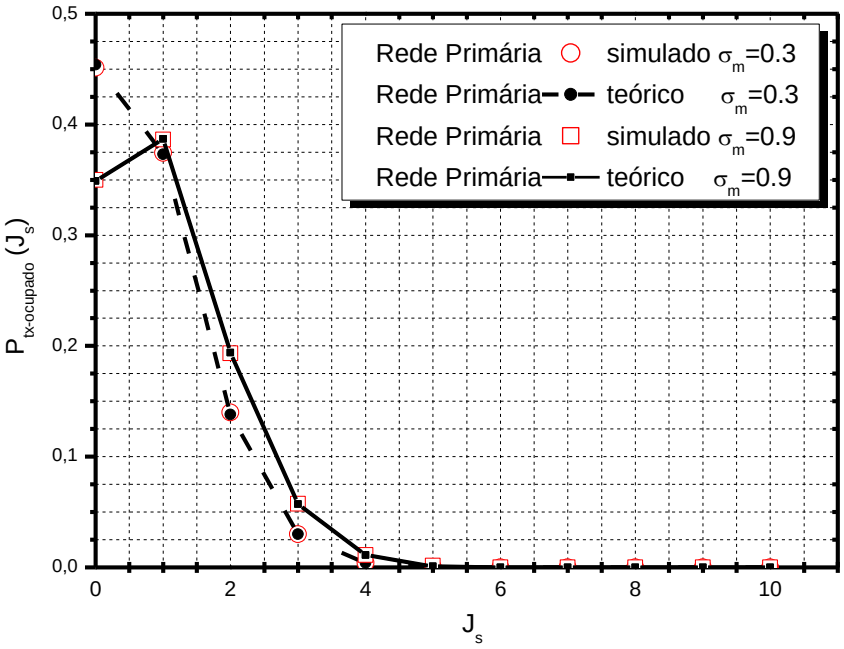


Figura 4.6: *probabilidade de J_s USs em tentativa de transmissão em um time slot na rede primária(N_s=10, S_{mi}=4 e P_{dUS}=0.9).*

A Tabela 4.1 representa os valores que os limitantes superiores e inferiores podem assumir em cada um dos *mini slots* na Eq.(4.37).

Tabela 4.1: *Valores dos limitantes que cada mini slot deve assumir*

Mini slot	Limitantes inferiores e superiores na geração de pacotes em cada *mini slot*	Limitantes- Inferiores e Superiores no processo de transmissão em cada *mini slot*
N° 1	x_0=0 $B_0=N_s$ $0 \leq x_0 \leq B_0$	$\{C_0=0$ *se* $(N_s- x_0) \geq J_s$ *Caso contrário,* $C_0= J_s- (N_s- x_0)$ $\}$. $\{D_0= x_0$ *se* $x_0 \leq J_s$ *Caso contrário* $D_0=J_s$ $\}$. $\{C_0 \leq j_0 \leq D_0\}$.
N° 2	$\{A_1=0$ *se* $(N_s- x_0) \geq (J_s- j_0)$	$\{C_1=0$ *se* $(N_s- x_0- x_1) \geq (J_s- j_0)$

	Caso contrário, $A_1=(J_s-j_0)-(N_s-x_0)$ *}.* $B_1=(N_s-x_0)$ $A_1 \leq x_1 \leq B_1$	*Caso contrário,* $C_1=(J_s-j_0)-(N_s-x_0-x_1)$ *}.* *{*$D_1=x_1$ *se* $x_1 \leq (J_s-j_0)$ *Caso contrário* $D_1=(J_s-j_0)$ *}.* $\{C_1 \leq j_1 \leq D_1\}$.
		.
$N°\ s_{mi}-1$	$AS_{mi-1}=0$ *se* $(N_s-x_0-x_1-\ldots-xS_{mi-2}) \geq (J_s-j_0-j_1-\ldots-jS_{mi-2})$ *Caso contrário,* $AS_{mi-1}=(Js-j_0-j_1-\ldots-jS_{mi-2})-(Ns-x_0-x_1-\ldots-xS_{mi-2})$ *}.* $BS_{mi-1}=(N_s-x_0-x_1-\ldots-xS_{mi-2})\}$. $AS_{mi-1} \leq xS_{mi-1} \leq BS_{mi-1}$	*{* $CS_{mi-1}=0$ *se* $(Ns-x_0-x_1-\ldots-xS_{mi-2}-xS_{mi-1}) \geq (J_s-j_0-j_1-\ldots-jS_{mi-2})$ *Caso contrário,* $CS_{mi-1}=(J_s-j_0-j_1-\ldots-jS_{mi-2})-(N_s-x_0-x_1-\ldots-xS_{mi-2}-xS_{mi-1})$ *}.* *{* $DS_{mi-1}=xS_{mi-1}$ *se* $xS_{mi-1} \leq (J_s-j_0-j_1-\ldots-jS_{mi-2})$ *Caso contrário* $DS_{mi-1}=(J_s-j_1-\ldots-jS_{mi-1})$ *}.* $\{CS_{mi-1} \leq jS_{mi-1} \leq DS_{mi-1}\}$.
$N°\ s_{mi}$	$\{AS_{mi}=J_s-j_0-j_1-\ldots-jS_{mi-1}\}$ $BS_{mi}=(N_s-x_1-x_2-\ldots-xS_{mi-1})\}$. $\{AS_{mi} \leq xS_{mi} \leq BS_{mi}$	$JS_{mi}=J_s-j_1-\ldots jS_{mi-2}-jS_{mi-1}$

4.9.2 Probabilidade de captura na rede primária no novo modelo

Em um *time slot* ocupado pelo UP, se o PAS detecta o canal livre e o US detecta o canal ocupado, o que ocorre com probabilidade ($1-P_{dPAS}$) (P_{dUS}), o efeito desta decisão resulta na transmissão apenas do UP. No entanto, se o PAS e o US detectam o canal como livre, o que ocorre com probabilidade ($1-P_{dPAS}$) ($1-P_{dUS}$), o efeito desta decisão resulta na transmissão simultânea entre o UP e US. A probabilidade de captura da rede primária, dada pela Eq.(3.10) é modificada para considerar a $(P_{tx\text{-}ocupado}(J_s))$, conforme representado por:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{pcap}\rightarrow\mathrm{PAP}}(I_p, J_s) = \left[\left(\frac{1}{R+1} \right)^{I_p-1} P_{tx-ocupado}(J_s) \left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1} \right)^{J_s} \right]. \qquad (4.38)$$

A Eq.(4.38) mostra que a probabilidade de captura do PAP pelo pacote de interesse de um UP depende do limiar da razão de captura (*R*), do número de usuários disputando um *time slot* e da relação entre as potências das redes primária e secundária.

Em um *time slot* ocupado pelo UP, se o PAS detecta o canal como ocupado, o que ocorre com probabilidade (P_{dPAS}), o efeito desta decisão resulta na transmissão de pacotes apenas pelos UPs. Neste caso, a probabilidade de captura pelo PAS na rede primária, dada pela Eq.(4.5) é modificada para considerar tal decisão, conforme apresentado em:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{pcap}\rightarrow\mathrm{PAP}}(I_p)=\left[\left(\frac{1}{R+1}\right)^{I_p\text{-}1} P_{dPAS}\right]. \tag{4.39}$$

A Eq.(4.39) mostra que a probabilidade de captura do pacote de interesse pelo PAP no novo modelo depende do limiar da razão de captura (*R*), do número de usuários primários disputando um *time slot* e da probabilidade de detecção $P_{dPAS.}$

4.9.3 Taxa média de erros de pacotes

A PER e a PSR podem ser obtidas de forma aproximadas pelas equações (3.21) e (3.22), aqui reproduzidas:

$$P_{ave}(\Delta_p)\leq 1-\mathrm{e}^{-w_0/\Delta_p}, \tag{4.40}$$

$$PSR(\Delta_p)\geq \mathrm{e}^{-w_0/\Delta_p}. \tag{4.41}$$

4.9.4 Cálculo da vazão da rede primária do novo modelo

A vazão da rede primária é definida novamente como sendo o número médio total de pacotes gerados pelos UPs que são recebidos corretamente pelo PAP, durante um *time slot*, conforme dado por:

$$V_{np} = \left[\begin{array}{c} \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{J_s=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} \sigma^i{}_p \left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i} i \left[\left(\left(\frac{\gamma_1}{R+\gamma_1} \right)^{J_s} P_{tx-ocupado}\left(J_s\right) e^{-w_0\left((i-1)+\left(\frac{J_s}{\gamma_1}\right)\right)} \right) \left(\frac{1}{R+1} \right)^{i-1} \right] + \\ + \sum_{i=0}^{N_p} \binom{N_p}{i} \sigma^i{}_p \left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i} i \left[\left(\frac{1}{R+1} \right)^{i-1} e^{-w_0(i-1)} (P_{dPAS}) \right] \end{array} \right] . \quad (4.42)$$

4.10 Análise de desempenho da rede secundária no novo modelo

Na rede secundária considera-se a hipótese do estado real do canal estar ocupado pelo UP ou livre.

Se o estado real do canal é ocupado por um UP, a probabilidade de J_s USs estarem em tentativa de transmissão em um *time slot* é dada pela Eq.(4.37).

Se o estado real do canal é livre da presença do UP, o PAS sensorea o canal no inicio de um *time slot,* decide se o mesmo está livre ou ocupado, e informas as USs. Se o PAS errar na detecção, o que ocorre com probabilidade (P_{fPAS}), nenhum US poderá transmitir neste *slot* e o mesmo é desperdiçado. Se o PAS acertar na detecção, o que ocorre com probabilidade (1-P_{fPAS}), o *slot* poderá ser utilizado pelos USs e o processo de detecção de portadora pelos USs, descritos a seguir, será utilizado.

O primeiro *mini slot* do *slot* certamente estará livre. Assim, as USs que desejarem transmitir neste *mini slot* o farão com probabilidade (1-P_{fUS}).

A partir do segundo *mini slot* o resultado do processo de detecção depende se algum US iniciou transmissão nos *mini slots* anteriores ou não. Se nenhuma US iniciou transmissão nos *mini slots* anteriores, uma US que deseja transmitir no *mini slot* corrente o fará com probabilidade (1-P_{fPAS}). No entanto, se alguma US iniciou transmissão nos *mini slots* anteriores o canal já está ocupado e, portanto, uma US que desejar transmitir só o fará se errar o processo de detecção, o que ocorre com probabilidade (1-P_{dUS}).

4.10.1 Probabilidade de o usuário secundário tentar transmitir em um time slot livre pelo usuário primário

A probabilidade de J_s USs estarem em tentativa de transmissão em um *time slot* livre da presença do UP representada por ($P_{tx\text{-}livre}(J_s)$) é calculada pela Eq.(4.43):

$$
\begin{aligned}
P_{tx-ocupado}(J_s) = (1-P_{fPAS})^{\sum_{x_0=0}^{B_0=N_s}\sum_{j_0=C_0}^{D_0}\sum_{x_1=A_1}^{B_1}\sum_{j_1=C_1}^{D_1}\cdots\sum_{x_{s_{mi-1}}=A_{s_{mi-1}}}^{B_{s_{mi-1}}}\sum_{j_{s_{mi-1}}=C_{s_{mi-1}}}^{D_{s_{mi-1}}}\sum_{x_{s_{mi}}=A_{s_{mi}}}^{B_{s_{mi}}}} \\
\left(\left(\binom{B_0}{x_0}\sigma_{mi}^{\,x_0}(1-\sigma_{mi})^{B_0-x_0}\right)\left(\binom{x_0}{j_0}(1-P)^{j_0}(P)^{x_0-j_0}\right)\right) \\
\left(\left(\binom{B_1}{x_1}\sigma_{mi}^{\,x_1}(1-\sigma_{mi})^{B_1-x_1}\right)\left(\binom{x_1}{j_1}(1-P)^{j_1}(P)^{x_1-j_1}\right)\right)\cdots \\
\left(\left(\binom{B_{s_{mi}-1}}{x_{s_{mi}-1}}\sigma_{mi}^{\,x_{s_{mi-1}}}(1-\sigma_{mi})^{B_{s_{mi-1}}-x_{s_{mi-1}}}\right)\left(\binom{x_{s_{mi}-1}}{j_{s_{mi-1}}}(1-P)^{j_{s_{mi-1}}}(P)^{x_{s_{mi-1}}-j_{s_{mi-1}}}\right)\right) \\
\left(\left(\binom{B_{s_{mi}}}{x_{s_{mi}}}\sigma_{mi}^{\,x_{s_{mi}}}(1-\sigma_{mi})^{B_{s_{mi}}-x_{s_{mi}}}\right)\left(\binom{x_{s_{mi}}}{j_{s_{mi}}}\left((1-P)^{j_{s_{mi}}}\right)(P)^{x_{s_{mi}}-j_{s_{mi}}}\right)\right).
\end{aligned}
\tag{4.43}
$$

Onde P é um parâmetro probabilístico de decisão que pode assumir os valores (P_{fUS}) ou (P_{dUS}), dependendo do estado do canal; os outros parâmetros foram definidos na Seção 4.8.1.

Para validar a Eq.(4.43), comparou-se os resultados obtidos com o uso desta equação com os obtidos por meio de uma simulação de Monte Carlo, como mostram as Figuras 4.7 e 4.8. Percebe-se que os resultados teóricos e simulados são praticamente idênticos para os valores de P_{fUS} e P_{dUS} apresentados nas figuras.

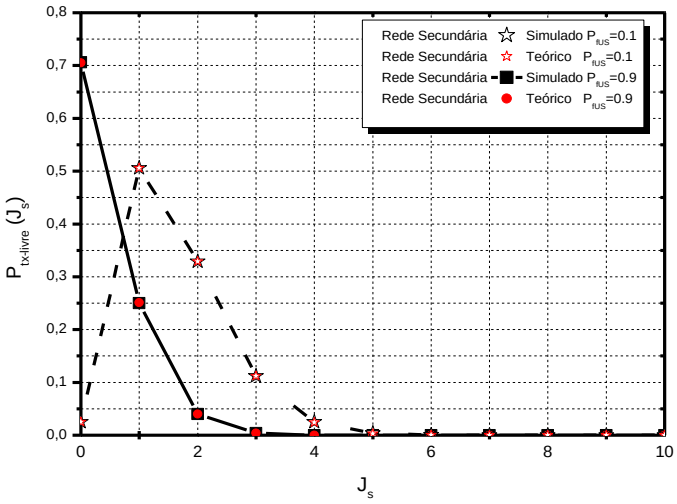


Figura 4.7*: probabilidade de J_s US em tentativa de transmissão em um time slot (N_s=10, σ_{mi}=0.1, S_{mi}=4 e P_{dUS}=0.9).*

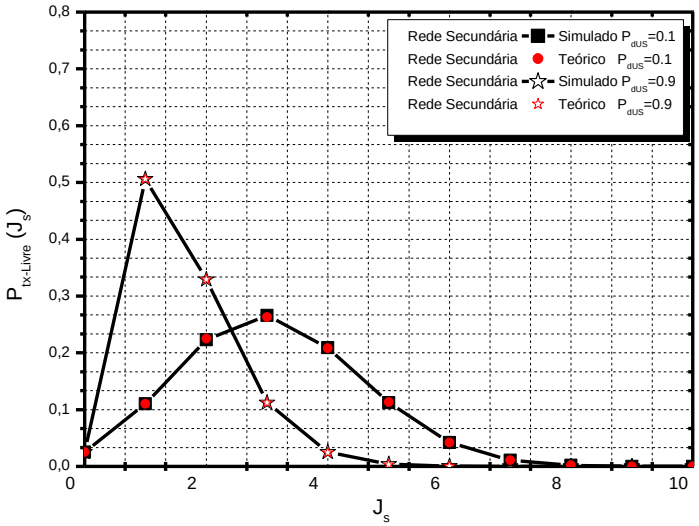


Figura 4.8: *probabilidade de J_s US em tentativa de transmissão em um time slot (N_s=10, S_{mi}=4, P_{fUS}=0.1 e σ_{mi}=0.1)*

A Tabela 4.2 representa os valores que os limitantes superiores e inferiores podem assumir na Eq.(4.43).

Tabela 4.2: *Valores dos limitantes superiores e inferiores que cada mini slot pode a sumir na rede secundária*

Mini slot	Limitantes inferiores e superiores na geração de pacotes em cada *mini slot*	Limitantes- Inferiores e Superiores no processo de transmissão em cada *mini slot*
N° 1	x_0=0 $B_0=N_s$ $0 \leq x_0 \leq B_0$	*{C_0=0 se (N_s- x_0)≥J_s* *Caso contrário,* *C_0= J_s- (N_s- x_0)* *}.* *{D_0= x_0 se $x_0 \leq J_s$* *Caso contrário* *$D_0=J_s$* *}* *P= P_{fUS}* *{$C_0 \leq j_0 \leq D_0$ }.*
N° 2	*{ A_1=0 se (N_s- x_0)≥(J_s-j_0)* *Caso contrário,* *A_1=(J_s-j_0)-(N_s- x_0)* *}.* *B_1=(N_s- x_0)* *$A_1 \leq x_1 \leq B_1$*	*{C_1=0 se (N_s- x_0- x_1)≥(J_s- j_0)* *Caso contrário,* *C_1= (J_s- j_0)- (N_s- x_0- x_1)* *}.* *{D_1= x_1 se $x_1 \leq (J_s$-j_0)* *Caso contrário* *D_1=(J_s-j_0)* *}.* *Se j_0>0 Então P= (P_{dUS})* *Se não P=(P_{fUS})* *{$C_1 \leq j_1 \leq D_1$ }.*
. . .	. . .	. . .
N° s_{mi} -1	*A_{Smi-1}=0 se (N_s- x_0- x_1- …-x_{Smi-2}) ≥(J_s-j_0-j_1-…-j_{Smi-2})* *Caso contrário,* *A_{Smi-1}=(Js-j_0-j_1-...-j_{Smi-2})-(Ns- x_0- x_1-...-x_{Smi-2})* *}.* *B_{Smi-1}=(N_s- x_0- x_1-...-x_{Smi-2})}.*	*{* *C_{Smi-1}=0 se (Ns- x_0- x_1-... -x_{Smi-2}- x_{Smi-1})≥(J_s-j_0- j_1-...- j_{Smi-2})* *Caso contrário,* *C_{Smi-1}=(J_s- j_0- j_1-...- j_{Smi-2})-(N_s- x_0- x_1-...-x_{Smi-2}- x_{Smi-1})*

	$A_{Smi-1} \leq x_{Smi-1} \leq B_{Smi-1}$	*}.* *{ $D_{Smi-1}= x_{Smi-1}$ se $x_{Smi-1} \leq (J_s- j_0-j_1 -...- j_{Smi-2})$* *Caso contrário* *$D_{Smi-1}=(J_s-j_1- ...- j_{Smi-1})$* *}.* *Se qualquer um dos j ($j_0-j_1,.., j_{smi-2}$)>0 Então* *P= (P_{dUS})* *Se não P=(P_{fUS})* *{$C_{Smi-1} \leq j_{Smi-1} \leq D_{Smi-1}$ }.*
N° s_{mi}	*{$A_{Smi}=J_s-j_0-j_1-...-jS_{mi-1}$}* *$B_{Smi}=(N_s- x_1- x_2-...-xS_{mi-1})$}.* *{$A_{Smi} \leq x_{Smi} \leq B_{Smi}$*	*Se qualquer um dos j ($j_0, j_1,.. j_{smi-1}$)>0* *Então P= (P_{dUS})* *Se não P=(P_{fUS})* *$J_{Smi}= J_s-j_0- ...j_{Smi-2}- j_{Smi-1}$*

4.10.2 Probabilidade de captura na rede secundária no novo modelo

A probabilidade de captura do novo modelo na rede secundária depende do estado real do canal estar ocupado pelo UP ou livre.

Se o estado real do canal é livre da presença do UP, a probabilidade de captura, dada pela Eq.(4.18), é modificada para considerar a $P_{tx\text{-}livre}(J_s)$, conforme representado pela Eq.(4.44):

$$\mathrm{P}_{\mathrm{pcap}\rightarrow\mathrm{PAS}}(J_s)=\left(\left(\frac{1}{R+1}\right)^{J_s-1} P_{tx-livre}\left(J_s\right)\right). \qquad (4.44)$$

A Eq.(4.44) mostra que a probabilidade de captura do pacote de interesse pelo PAS no novo modelo depende do limiar da razão de captura (R) e do número de usuários disputando um *time slot*.

Se o estado real do canal é ocupado por um UP, a probabilidade de captura, dada pela Eq.(3.11), é modificada para considerar a $P_{tx\text{-}ocupado}(J_s)$, conforme representado pela Eq.(4.45):

$$\mathrm{P}_{\mathrm{pcap}\rightarrow\mathrm{PAS}}(I_p, J_s) = \left(\left[\left(\frac{1}{R\gamma_1 + 1} \right)^{I_p} \left(\frac{1}{R+1} \right)^{J_s - 1} P_{tx-ocupado}\left(J_s\right) \right] \right). \tag{4.45}$$

Onde a Eq.(4.45) mostra que a probabilidade de captura do pacote de interesse pelo PAS no novo modelo depende do limiar da razão de captura (*R*), do número de usuários disputando um *time slot* e da relação entre as potências das redes primária e secundária.

4.10.3 Taxa média de erros de pacotes

A PER e a PSR podem ser obtidas de forma aproximadas pelas equações (3.21) e (3.22), aqui reproduzidas:

$$P_{ave}(\Delta_s) \leq 1 - \mathrm{e}^{-w_0/\Delta_s}, \tag{4.46}$$

$$PSR(\Delta_s) \geq \mathrm{e}^{-w_0/\Delta_s}. \tag{4.47}$$

4.10.4 Cálculo da vazão da rede secundária para o novo modelo

Para o novo modelo, a vazão da rede secundária (V_{ns}) é definida novamente 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 e agora considerando o efeito do sensoriamento imperfeito na rede secundária. A vazão da rede secundária é dada por:

$$V_{ns} = \left[\begin{array}{l} \left[\dfrac{T_{mi}\left(1-\sigma_p\right)^{N_p}}{T_{mi}+S_{mi}} \sum_{J_s=0}^{N_s} J_s \left[\left(\dfrac{1}{R+1} \right)^{J_s-1} e^{-w_0(J_s-1)} P_{tx-livre}(J_s) \right] \right] + \\ + \left[\begin{array}{l} \dfrac{T_{mi}}{T_{mi}+S_{mi}} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{J_s=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} \sigma^i{}_p \left(1-\sigma_p\right)^{N_p-i} \\ J_s \left[\left(\left(\dfrac{1}{R\gamma_1+1} \right)^i \left(\dfrac{1}{R+1} \right)^{J_s-1} P_{tx-ocupado}(J_s) e^{-w_0\left((i\gamma_1)+(J_s-1)\right)} \right) \right] \end{array} \right] \end{array} \right] \tag{4.48}$$

4.11 Cálculo da vazão global para novo modelo

A vazão global do sistema do novo modelo é a soma das vazões obtidas nas Eq.(4.42) e Eq.(4.48) conforme dado por:

$$V_{nt} = V_{np} + V_{ns}. \tag{4.49}$$

4.12 Resultados numéricos

Nesta seção são mostrados e comparados os resultados numéricos obtidos para o novo modelo. Estes resultados são confrontados com os resultados do modelo original apresentados em [14]. Para que tal comparação fosse possível, os parâmetros e considerações feitas para traçar os gráficos de vazão para o novo modelo foram os mesmos usados no modelo original. Os gráficos são traçados em função da carga oferecida na rede primária. Os gráficos para a vazão das redes primária, secundária e global são apresentados nas Figuras 4.9 a Figura 4.18. Todos os gráficos foram traçados considerando: modelo original e novo modelo. Foi levada em conta modulação BPSK coerente, sem codificação de canal e tamanho de pacote igual a 127 [*bits*]. Para comparação dos resultados entre o novo modelo e o original, foram considerados os parâmetros de [14]: $N_p = N_s = 10$, R=3 [dB], γ_1=10, w_0=*-3,4467*, S_{mi}=*5 e* T_{mi}=*10*. Para o novo modelo são adicionados os valores de P_{dPAS}=P_{dUS}=0.9 e P_{fPAS}= P_{fUS} =0.1.

A **Figura 4.9** apresenta a influência da probabilidade de detecção atribuída ao PAS na vazão da rede primária. Percebe-se que a vazão da rede primária diminui à medida em que o valor de P_{dPAS} diminui. Para que a vazão da rede primária tenha bom resultado é necessário que o valor de P_{dPAS} seja o mais alto possível, o que reduz a tentativa de transmissão dos USs e, portanto, minimiza o nível de interferência causado pelos USs na comunicação da rede primária. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original, apresenta um resultado otimista em relação aos obtidos no novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

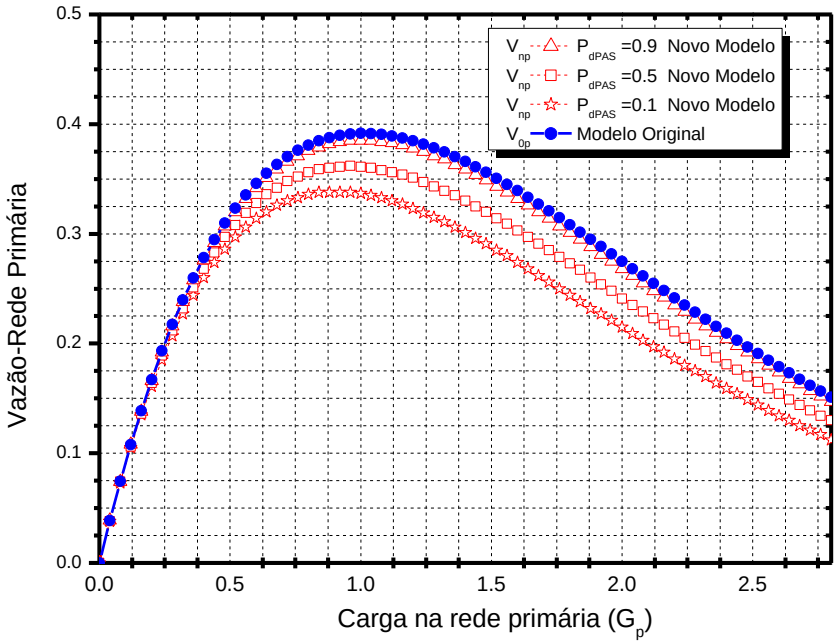


Figura 4.9: *Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3d e, P_{dUS}=0.9)*

A **Figura 4.10** apresenta a influência da probabilidade de detecção atribuída aos USs na vazão da rede primária. À medida em que o valor de P_{dUS} diminui, a probabilidade de captura pelo PAP diminui, o que reduz a vazão da rede primária. Como forma de melhorar o desempenho da rede primária é necessário que o valor de P_{dUS} seja o mais alto possível, o que reduz a probabilidade dos USs interferirem na rede primária. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

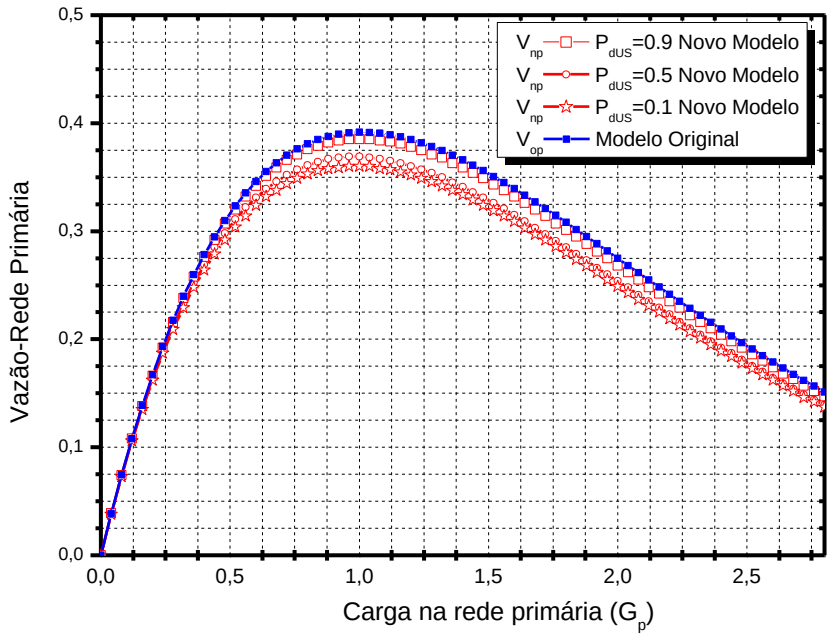


Figura 4.10: *Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB e P_{dPAS}=0.9).*

A **Figura 4.11** apresenta a influência do parâmetro N_s na vazão da rede primária. À medida em que o valor de N_s cresce, o número de USs interferindo na comunicação da rede primária aumenta, o que reduz a vazão da rede primária. O modelo original apresenta resultado ligeiramente otimista em relação ao novo modelo, que considera os erros de detecção.

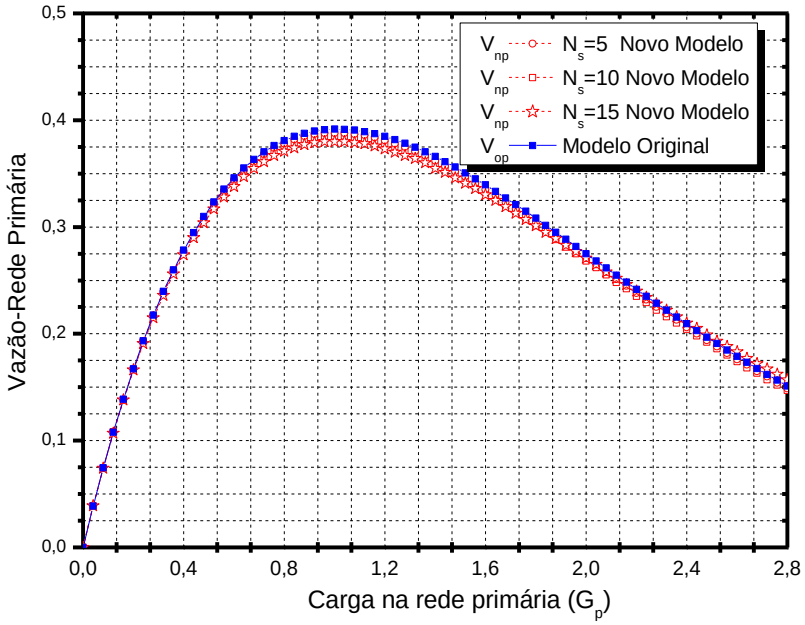


Figura 4.11: *Vazão da rede primária: comparação entre os modelos novo e original (N_p=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dPAS}= P_{dUS}=0.9)*

A Figura 4.12 compara a vazão na rede primária no sistema em que utiliza-se o protocolo *Slotted - Aloha* nas redes primária e secundária, analisado no Capítulo 3, com o sistema em que utiliza-se *Slotted - Aloha* na rede primária e *Slotted* - CSMA na rede secundária, analisado no Capítulo 4. Para comparar os resultados numéricos entre as vazões dos modelos propostos, foram fixados os valores de P_d=P_{dPAS}=*0.9* e N_p=N_s=*10*, entretanto, variou-se os valores de $P_{dUS,}$ para a rede com *Slotted* – CSMA, para analisar a diferença de desempenho dos modelos. Observa-se que o uso de *Slotted* - CSMA na rede secundária resulta em uma melhoria na vazão da rede primária principalmente à medida que P_{dUS} cresce, pois a rede secundária interfere menos na rede primária.

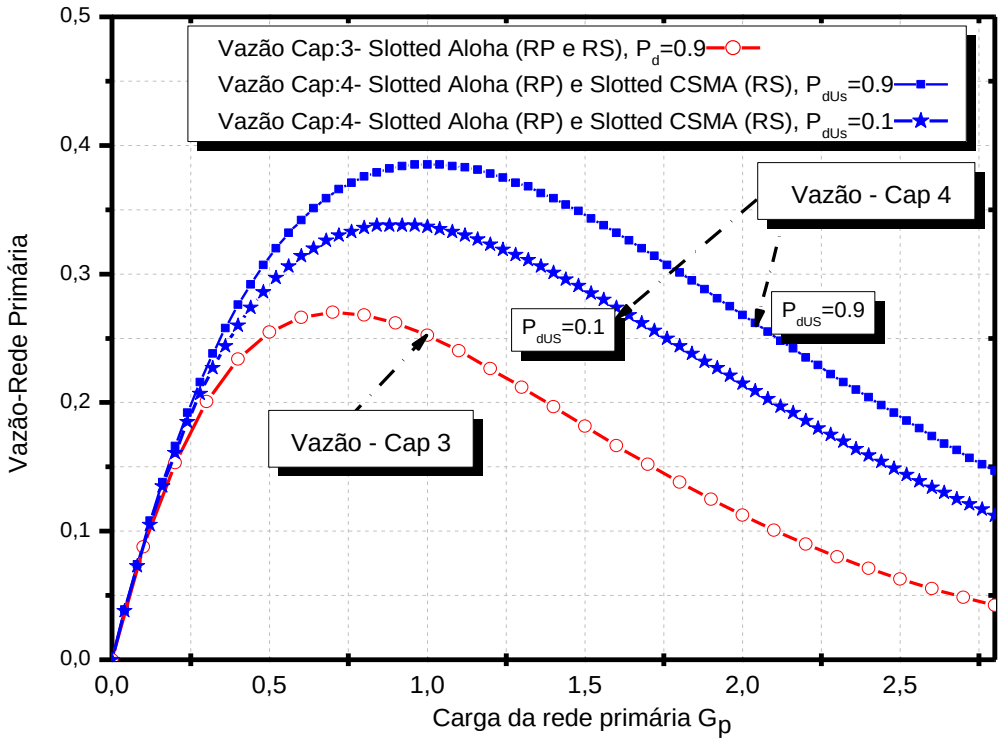


Figura 4.12: - *Vazão da rede secundária comparação entre os novos modelos propostos nos capítulos 3 e 4.*

A **Figura 4.13** apresenta a influência da probabilidade de falso alarme atribuída ao PAS na vazão da rede secundária. À medida em que o valor de P_{fPAS} cresce, aumenta os USs que deixam de aproveitar melhor as oportunidades espectrais disponíveis no canal; assim, diminuem as tentativas de transmissão dos USs e a vazão da rede secundária cai. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

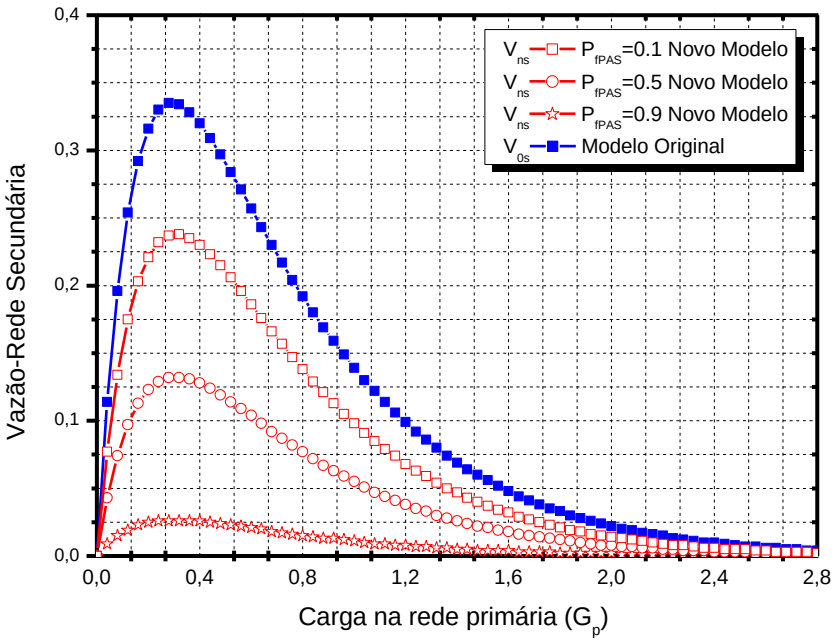


Figura 4.13: *Vazão da rede secundária comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dPAS}= P_{dUS}=0.9 P_{fUS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*

A **Figura 4.14** apresenta a influência da probabilidade de falso alarme atribuída aos USs na vazão da rede secundária. Para valores de carga pequenas na rede primária, à medida em que o valor de P_{fUS} diminui, a vazão da rede secundária cresce. A partir de um certo valor de carga na rede primária, pode-se obter maiores vazões na rede secundária com maiores valores de P_{fUS}, em função da interferência gerada pelos usuários secundários. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original, apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com novo modelo mais realista por considerar os erros de detecção.

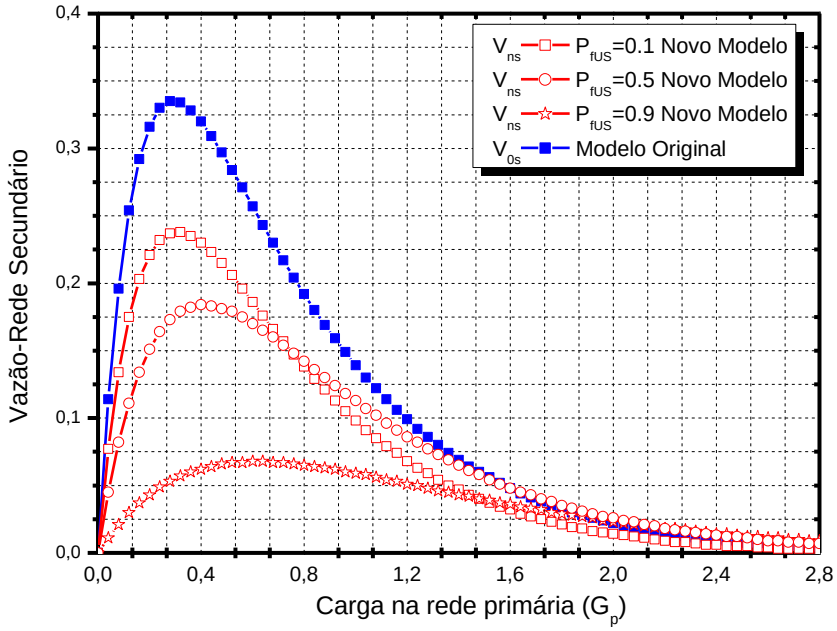


Figura 4.14: *Vazão da rede secundária comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dPAS}= P_{dUS}=0.9, P_{fPAS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*

A **Figura 4.15** apresenta a influência da P_{dUS} na vazão da rede secundária. Quando a carga na rede primária é alta, a probabilidade de captura pelo PAS é baixa para qualquer valor de P_{DUS}, devido ao nível de interferência gerado pela rede primária e, portanto, P_{dUS} quase não influencia na rede secundária. Na situação em que a carga na rede primária é pequena, à medida em que o valor de P_{dUS} diminui, aumenta o número de usuários secundários transmitindo em potência mais alta e, consequentemente, aumenta a interferência na rede secundária e a probabilidade de captura pelo PAS e a vazão tendem a cair. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo.

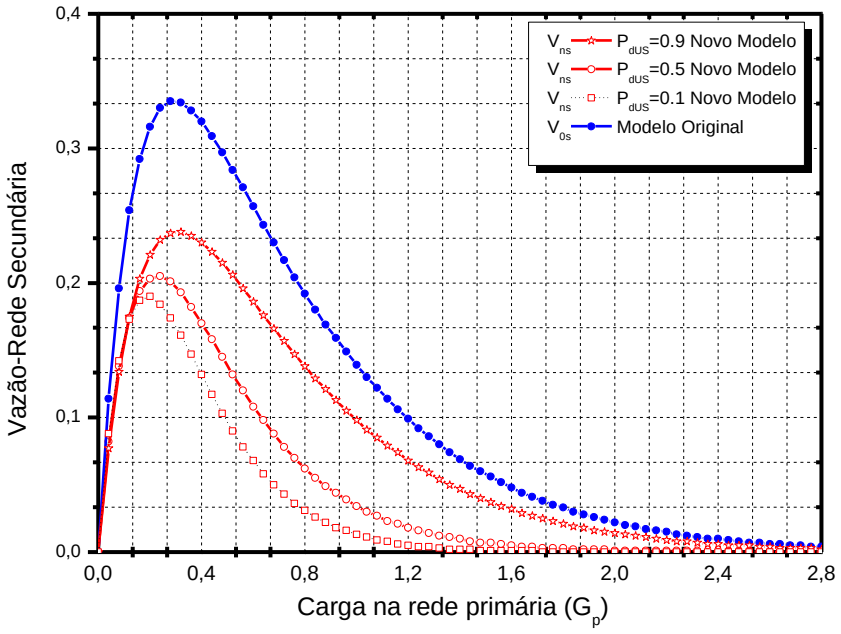


Figura 4.15: – *Vazão da rede secundária comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dPAS}=0.9 , P_{fPAS}=P_{fUS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*

A **Figura 4.16** apresenta a influência da P_{dPAS} na vazão da rede secundária. Quando há UP transmitindo, como P_{dUS} foi fixado em 0.9, a US só irá transmitir com probabilidade (1- P_{dPAS}) (1-0.9) = 0.1(1- P_{dPAS}). Logo, haverá poucas transmissões das USs. Ainda, como há primárias transmitindo, a probabilidade de captura do pacote pelo PAS é também baixa. Como consequência, percebe-se na figura que P_{dPAS} praticamente não influencia na vazão da rede secundária. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com novo modelo.

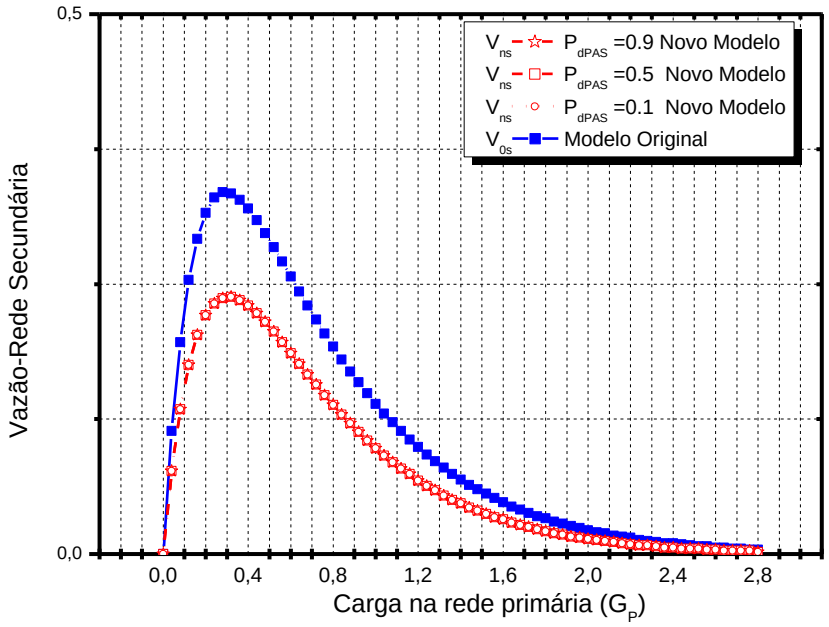


Figura 4.16: – *Vazão da rede secundária comparação entre os modelos novo e original (N_p=N_s=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dUS}=0.9 , P_{fPAS}=P_{fUS}=0.1,S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*

A **Figura 4.17** apresenta a influência do N_s na vazão da rede secundária. Para valores pequenos de carga na rede primária, à medida em que o valor de N_s cresce, o número de USs que tentam transmitir pacotes na rede também cresce, o que aumenta a probabilidade de captura e a vazão na rede. No entanto, a partir de um certo valor de carga na rede primária, um valor maior de N_s resulta em menor vazão, devido à grande interferência proveniente dos USs. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo.

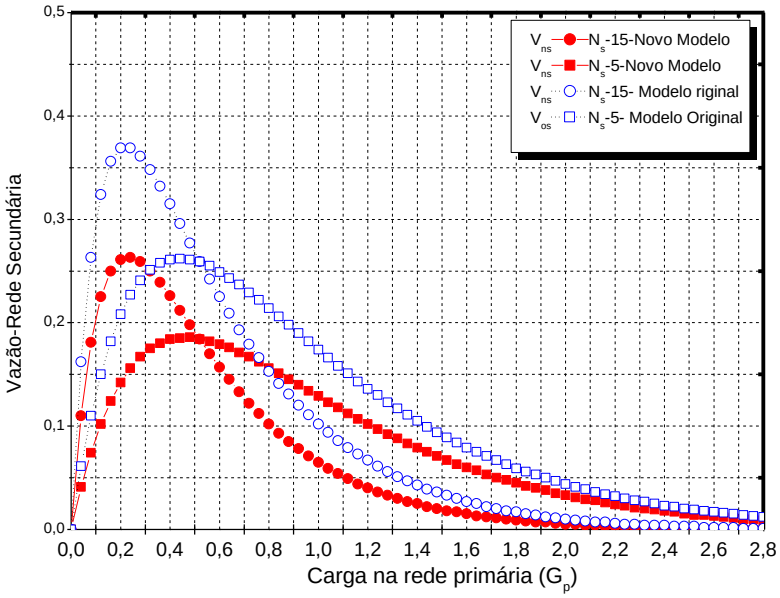


Figura 4.17: – *Vazão da rede secundária comparação entre os modelos novo e original (N_p=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dPAS}= P_{dUS}=0.9, P_{fPAS}=P_{fUS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*

A Figura 4.18 compara a vazão na rede secundária no sistema em que utiliza-se o protocolo *Slotted - Aloha* nas redes primária e secundária, analisado no Capítulo 3, com o sistema em que utiliza-se *Slotted - Aloha* na rede primária e *Slotted* - CSMA na rede secundária, analisado no Capítulo 4. Para comparar os resultados numéricos entre as vazões dos modelos propostos, foram fixados os valores de P_d=P_{dPAS}=*0.9* e N_p=N_s=*10*, entretanto, variou-se os valores de P_{dUS} na rede secundária com *Slotted - CSMA*, para analisar a diferença de desempenho dos modelos. Observa-se que o uso do *Slotted* - CSMA na rede secundária resulta em uma melhoria na vazão na rede secundária para valor de carga pequena, situação em que ocorre pouca interferência por parte dos usuários. No entanto, a partir de um certo valor de carga da rede primária o uso do *Slotted - CSMA* na rede secundária resulta em uma piora na vazão na rede secundária, devido ao fato do canal estar a maior parte do tempo ocupado pela rede primária, o que diminui as oportunidades de transmissão pela rede secundária.

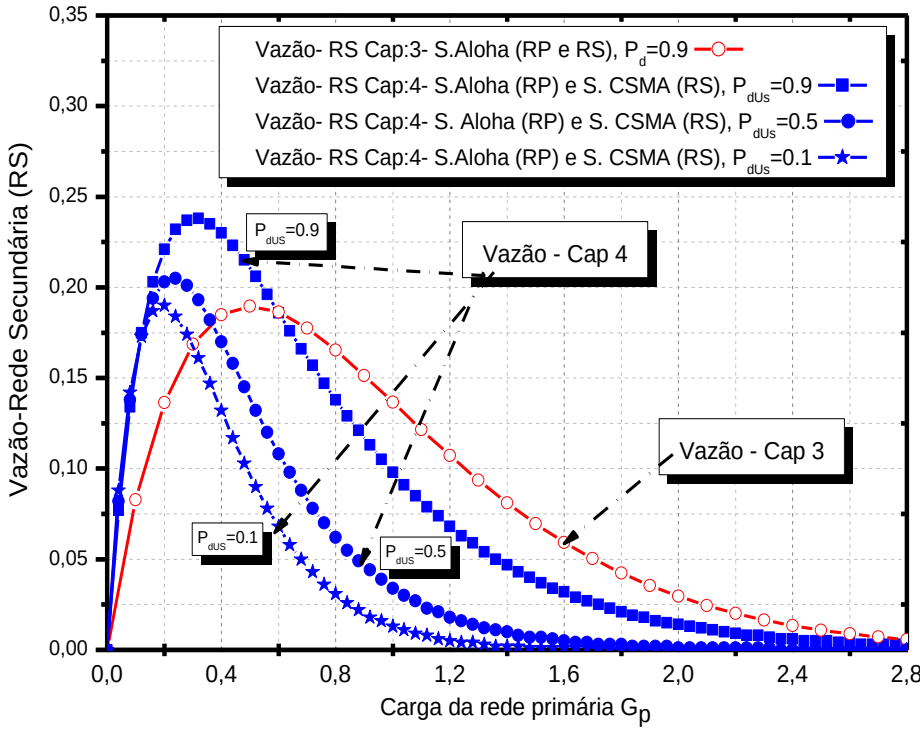


Figura 4.18: - *Vazão da rede secundária comparação entre os novos modelos propostos nos capítulos 3 e 4.*

A Figura 4.19 compara a vazão na rede secundária no sistema em que utiliza-se o protocolo *Slotted Aloha* nas redes primária e secundária, analisado no Capítulo 3, com o sistema em que utiliza-se *Slotted Aloha* na rede primária e *Slotted* - CSMA na rede secundária, analisado no Capítulo 4. Para comparar os resultados numéricos entre a vazão dos modelos propostos, foram fixados os valores de $P_d=P_{dPAS}=0.9$ e $N_p=N_s=10$, entretanto, variou-se os valores de P_{fUS} na rede com *Slotted - CSMA*, para analisar a diferença de desempenho dos modelos. Observa-se que para valores de carga pequena na rede primária e valores de P_{fUS} menor ou igual à 0.5, o uso do *Slotted* - CSMA na rede secundária resulta em uma melhoria na vazão na rede secundária. A partir de certo valor de carga na rede primária, o uso do *Slotted Aloha* na rede secundária resulta em uma melhoria na vazão da rede secundária.

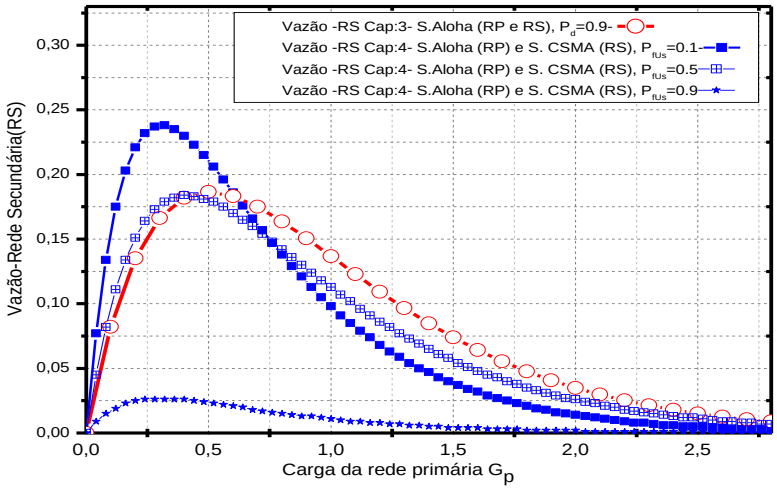


Figura 4.19: - *Vazão da rede secundária comparação entre os novos modelos propostos nos capítulos 3 e 4.*

A **Figura 4.20** apresenta a influência da probabilidade de detecção atribuída ao PAS na vazão da rede global, a qual é a soma das vazões nas redes primária e secundária. À medida em que o valor de P_{dPAS} aumenta, a vazão global cresce, principalmente pela vazão na rede primária. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

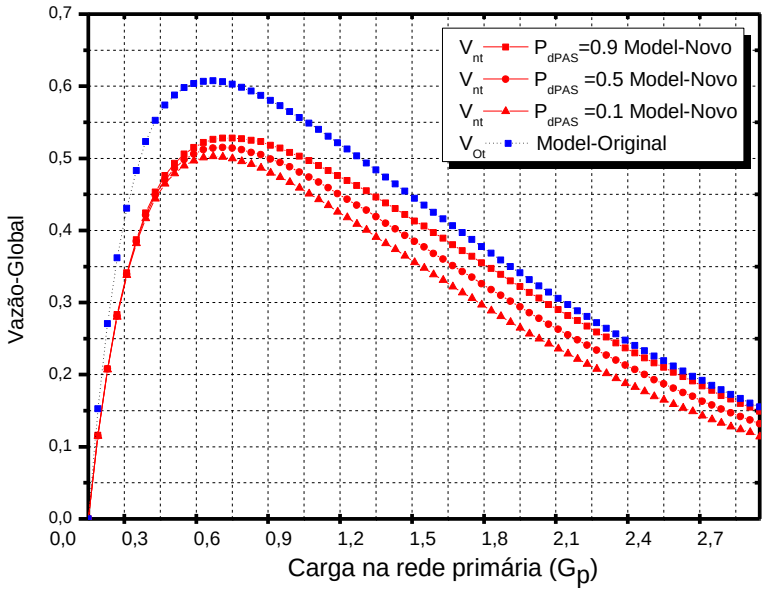


Figura 4.20: *– Vazão da rede Global comparação entre os modelos novo e original (N_s=N_p=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dUS}=0.9 , P_{fPAS}=P_{fUS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*

A **Figura 4.21** apresenta a influência da probabilidade de detecção atribuída aos USs na vazão da rede global. À medida em que o valor de P_{dUS} cresce, a vazão

global cresce, devido ao aumento das vazãos nas redes primária e secundária. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

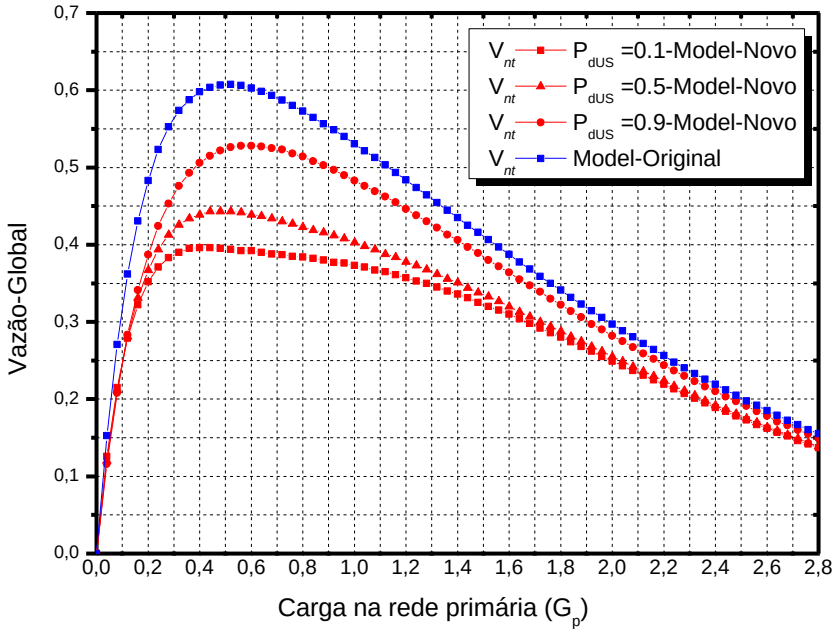


Figura 4.21: – *Vazão da rede Global comparação entre os modelos novo e original (N_s=N_p=10, γ_1=10, R=3dB, P_{dUS}=0.9 , P_{fPAS}=P_{fUS}=0.1, S_{mi}=5 e T_{mi}=10)*

Tabela:4.3 sumarizada em termos da vazão

Figura	*Descrição*	*Resumo*	*Conclusão*
Figura 4.9, Pagina 101.	Influência do parâmetro P_{dPAS} no cálculo da vazão do novo modelo na rede primária.	À medida que o valor de P_{dPAS} diminui, aumenta as possibilidades do US interferir na comunicação da rede primária, como consequência o desempenho do sistema diminui.	Conclui-se que o parâmetro P_{dPAS} tem influência significativa sobre o desempenho do novo modelo, principalmente à medida que o valor de P_{dPAS} diminui. Ao comparar o modelo original e o novo, verifica-se que o modelo original apresenta resultado otimista em relação aos resultados obtidos no novo modelo, mais realista.
Figura 4.10, Pagina 102.	Influência do parâmetro P_{dPad} no cálculo da vazão do novo modelo na rede primária.	À medida que o valor de P_{dUs} diminui, aumenta as possibilidades do US interferir na comunicação da rede primária, como consequência o desempenho do sistema diminui..	Conclui-se que o parâmetro P_{dUs} tem influencia sobre o desempenho do novo modelo, principalmente à medida que o valor de P_{dPAS} diminui. Ao comparar o modelo original e o novo, verifica-se que o modelo original apresenta resultado otimista em relação aos resultados obtidos no novo modelo, mais realista.
Figura 4.11, Pagina 103.	Influência do parâmetro *Ns* no cálculo da vazão do novo modelo na rede primária.	À medida que o valor de N_s cresce o número de USs interferindo na rede primária aumenta, neste caso a probabilidade de captura pelo PAP do modelo original e novo diminuem devido aos níveis de interferências proveniente dos USs.	Conclui-se que o parâmetro N_s tem pouca influência sobre a vazão do novo modelo devido aos valores altos de P_{dPAS} e P_{dUS}. Ao comparar o modelo original e o novo, verifica-se que o modelo original apresenta resultado otimista em relação aos resultados obtidos no novo modelo, mais realista.
Figura 4.12, Pagina	Influência do parâmetro P_{fPas} no	À medida que o valor de P_{fPas}	Conclui-se que o parâmetro P_{fPas} tem

104.	cálculo da vazão do novo modelo na rede secundária.	cresce, a vazão da rede secundária diminui devido o número de USs que deixam de aproveitar as oportunidades espectrais.	grande influência sobre o desempenho do novo modelo devido aos lotes ociosos que os USs deixam de aproveitar. Ao comparar o modelo original e o novo, verifica-se que o modelo original apresenta resultado otimista em relação aos resultados obtidos no novo modelo, mais realista.
Figura 4.13, Pagina 105.	Influência do parâmetro P_{fus} no cálculo da vazão do novo modelo na rede secundária.	À medida que o valor de P_{fUs} cresce, a probabilidade de captura pelo PAP diminui devido o número de USs que deixam de aproveitar as oportunidades espectrais.	Conclui-se que o parâmetro P_{fUs} tem grande influência sobre o desempenho do novo modelo devido aos lotes ociosos que os USs deixam de aproveitar. Ao comparar o modelo original e o novo, verifica-se que o modelo original apresenta resultado otimista em relação aos resultados obtidos no novo modelo, mais realista.
Figura 4.14, Pagina 106.	Influência do parâmetro P_{dUS} no cálculo da vazão do modelo novo para a rede secundária.	Para valores altos da carga do sistema, a probabilidade de captura pelo PAS é muito baixo para qualquer valor de P_{dUS}, devido os níveis de interferência causada pelos UPs. Na situação em que a carga do sistema é baixa, à medida que o valor de P_{dUS} diminui, a vazão da rede tende a diminuir, devido ao número de USs que interferem no sistema.	Conclui-se que o parâmetro P_{dUS} tem grande influencia sobre o desempenho do novo modelo devido aos erros de detecção que ocorre nos USs. Ao comparar o modelo original e o novo, verifica-se que o modelo original apresenta resultado otimista em relação aos resultados obtidos no novo modelo, mais realista.
Figura 4.15, Pagina 107.	Influência do parâmetro P_{dPas} no cálculo da vazão do modelo novo para a rede secundária.	Na vazão da rede secundária. Quando há UP transmitindo, a US só irá transmitir com probabilidade (1- P_{dPAS}) (1-0.9) = 0.1(1- P_{dPAS}). Logo, haverá poucas transmissões das USs. A probabilidade de captura do pacote pelo PAS é também baixa.	Pode-se dizer que P_{dPAS} praticamente não influencia, isso porque o valor de P_{dUS} é alto o que quer dizer que a maior parte do tempo os USs não poderão transmitir seus pacotes pelo fato de detectarem o canal ocupado. Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com novo modelo.
Figura 4.16, Pagina 108.	Influência do parâmetro *Ns* no cálculo da vazão do modelo original e novo modelo da rede secundária.	Para valores pequenos de carga do sistema, à medida em que o valor de N_s cresce, aumenta a vazão na rede. No entanto, a partir de um certo valor de carga do sistema, um valor maior de N_s resulta em menor vazão, devido à grande interferência proveniente dos USs	Fazendo uma comparação entre os modelos, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo.
Figura 4.17, Pagina 108.	Influência do parâmetro P_{dPas} no cálculo da vazão do novo modelo da rede global.	A vazão da rede global, a qual é a soma das vazões nas redes primária e secundária. À medida em que o valor de P_{dPAS} aumenta, a vazão global cresce, principalmente pela vazão na rede primária.	Fazendo uma comparação entre os modelos original e novo verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.
Figura 4.18, Pagina 109.	Influência do parâmetro P_{dUS} no cálculo da vazão do novo modelo da rede global.	À medida em que o valor de P_{dUS} aumenta, a vazão global cresce, devido ao aumento das vazões das redes primária e secundária .	Fazendo uma comparação entre os modelos original e novo, verifica-se que o modelo original apresenta um resultado otimista em relação aos resultados obtidos com o novo modelo, mais realista por considerar os erros de detecção.

4.13 Conclusão

Nesse capítulo analisou-se o desempenho, em termos de vazão, das redes primária e secundária e a vazão global de uma arquitetura que usa o protocolo *Slotted Aloha* na rede primária com N_p usuários e *Slotted* CSMA na rede secundária com N_s usuários secundários. Na análise da vazão das redes são considerados dois modelos: modelo original [14] e o novo modelo.

No modelo original as vazões são calculadas considerando um canal com desvanecimento Rayleigh, efeito de captura e a influência da PER.

Nesse trabalho é proposto um novo modelo que considera um canal com desvanecimento Rayleigh, efeito de captura, PER e o sensoriamento imperfeito, modelado por meio das probabilidades de detecção e falso alarme, tornando assim o modelo mais realista.

Os resultados encontrados nas redes primária, secundária e global do novo modelo mostram uma piora no desempenho das redes quando se considera P_{dPAS}, P_{dUS} ,P_{fPAS} *e* P_{fUS}, em relação ao modelo original. Assim sendo, tal efeito não pode ser ignorado nos cálculos, como acontece em [14].

Como estudo futuro, pode-se analisar o atraso médio nas redes primária e secundária. Além disso, mecanismos de códigos 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 e técnicas de sensoriamento cooperativo podem ser analisadas para minimizar os erros na detecção e consequentemente minimizar níveis de interferências na rede primária e secundária.

Capítulo 5: Conclusões finais e estudos futuros

Rádio cognitivo é uma importante tecnologia para atender a demanda por espectro nos serviços e aplicações emergentes em sistemas sem fio das próximas gerações, permitindo a flexibilidade do uso do mesmo. Neste ambiente, os rádios não licenciados deverão acessar o espectro com a premissa de evitar ou manter um nível de interferência que não prejudique a comunicação dos usuários licenciados. Neste caso, o espectro deixa de ser exclusivo do usuário licenciado e passa a ser compartilhado com o usuário não licenciado.

Os protocolos MAC são importantes para organizar eficazmente o acesso dos usuários ao canal. 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 aos usuários licenciados. 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.

Em [14] o desempenho das redes primária, secundária e global são analisadas para vários protocolos de acesso ao meio. Na primeira arquitetura analisada, os usuários usam o protocolo *Slotted Aloha* nas redes primária e secundária. Em um segundo caso, considera-se que os usuários da rede primária 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, efeito de captura e o efeito da PER. No entanto, As análises apresentadas em [14] não consideram dois aspectos importantes:

(1) sensoriamento imperfeito na rede secundária: este efeito ocorre devido às instabilidades dos canais de comunicação sem fio, como o desvanecimento e o ruído do canal.

(2) diferentes níveis de potência de transmissão na rede secundária em função da decisão do estado do canal: este efeito ocorre com a premissa de minimizar as interferências na rede primária.

O objetivo principal deste trabalho é estender as análises apresentadas em [14], considerando os efeitos de sensoriamento imperfeito e diferentes níveis de transmissão

na rede secundária. Assim sendo, neste trabalho propõe-se uma extensão do modelo original apresentado em [14], dando origem a um ***novo modelo***, onde se estuda e analisa o desempenho das redes primária, secundária e global.

Os resultados apresentados nos modelos propostos, em que considera-se o sensoriamento imperfeito, mostram que os parâmetros (P_d, P_{dPAS} e P_{dUS}) têm grande impacto sobre a vazão da rede primária. Por outro lado, os parâmetros (γ_0, γ_1, m e Ns) apresentam pouca influência sobre a vazão. Quando analisa-se a rede secundária, os resultados mostram que os parâmetros (γ_0, γ_1, m, Ns e P_d) não influenciam na vazão da rede secundária quando comparado ao modelo com sensoriamento perfeito. No entanto, os parâmetros (P_{dPAS} , P_{dUS}, P_{fpas} e P_{fUS}) apresentam uma grande influencia sobre a vazão da rede secundária.

Com base nas análises realizadas conclui-se que o sensoriamento imperfeito, modelado por meio das probabilidades de detecção e falso alarme, pode afetar o desempenho das redes de forma significativa. Assim sendo, tais efeitos não podem ser ignorados nos cálculos, como acontece em [14]. A influência dos diversos parâmetros do sistema em seu desempenho foi analisada em termos de vazão e atraso nas redes primária, secundária e global.

5.1 Propostas de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros ficam por se investigar técnicas de codificação de canal com o objetivo de reduzir a PER e assim melhorar o desempenho das redes. Além disso, técnicas de sensoriamento cooperativo na rede secundária podem ser desenvolvidas para melhorar o desempenho da detecção do espectro e consequentemente, interferir menos na rede primária.

6 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] .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] 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.

[7] D. S. Chaves, "Analysis of Spectral Sensing Power Detection", dissertation Master's dissertation in Electrical Engineering, Publishing PPGEE.DM-502/2012, Dep. of Engineering. Electrical. Univer. Of Brazilian, pp. 103, 2012.

[8] 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

[9] J. Strassner, "The role of autonomic networking in cognitive networks," in Cognitive Networks, 1st ed., New York, NY: Wiley, 2008, ch. 2, pp. 23-52

[10] A. Popescu, "Cognitive Radio Networks," in *9th International Conf. on Communications* 2012, Bucharest, Romania, pp. 11-15

[11] 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.

[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] 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.

[14] A. J. Faria, "Analise de desempenho de protocolos de múltiplo acesso em sistemas de rádios cognitivos," dissertação (mestrado), Instituto Nacional de telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí, MG, 2014.

[15] A. Goldsmith, "Wireless Communications," 1st ed., New York, NY: Cambridge University Press, 2005, ch. 1-3, pp. 1-82.

[16] G. L. Stüber, "Principles of Mobile Communication," 2nd ed., Norwell, MA: Kluwer Academics Publishers, 2000, ch. 1-3.

[17] N. Lynn, "Data Rate Adaptation and Cooperative Diversity for Future Wireless Communications,"Ph.D. dissertation, Graduate School of Science and Technology, Keyo University, Yokohama, Japan, 2011.

[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] W. Stallings, "Wireless Communications and Networks," 2nd ed., Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall, 2004, ch. 5, pp. 95-123.

[20] D.A. Guimarães, "Digital Transmission, Signals and Communication Technology," Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.

[21] 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.

[22] F. Vihlborg, "On Models for Interference Calculations between Radio

Communication Systems," M.S. Thesis, KTH, Signal Processing, Stockholm, Sweden, 2011.

[23] 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.

[24] P. Stavroulakis, "Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems," Norwood, MA: Artech House, 2003, ch. 1-5, pp. 13-272

[25] 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.

[26] 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.

[27] A. Zahedi and K. Pahlavan, "Throughput of a wireless LAN access point in presence of natural hidden terminals and capture effects," *17th IEEE International International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* 1996, PIMRC'96., Taipei, Taiwan, vol. 2, pp. 397-401.

[28] J. Linnartz, "Narrowband land-mobile radio networks," Boston, MA: Artech House, 1993, ch. 7, pp. 193-232.

[29] 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.

[30] 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.

[31] 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.

[32] H. Bai and M. Atiquzzaman, "Error modeling schemes for fading channels in wireless communication: a survey," *IEEE Communic. Survey & Tutories*, vol.

5, no. 2, Dec 2003, pp. 2-9.

[33] 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.

[34] G. Ozcan, M.C. Gursoy, and S. Gezici, "Error Rate Analysis of Cognitive Radio Transmissions with Imperfect Channel Sensing," IEEE Transactions on Wireless Communication vol. 13, pp.1642-1655 March 2014.

[35] T.Yucek and H. Arslan; "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," IEEE Communications Surveys and Tutorials., vol 11, FIRST QUARTER 2009, pp. 116 – 130.

[36] M.H.P. Alves, "Técnicas de sensoriamento espectral paralelo á transmissão baseadas em auto valores sob cooperação espaço- temporal em redes de rádios cognitivos", dissertação (mestrado), Instituto Nacional de telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí, MG, 2015

[37] IEEE 802.22-2011(TM) Standard for Cognitive Wireless Regional Area Networks (RAN) for Operation in TV Bands. Published as an Official IEEE Standard on July 1st 2011.

[38] A. M. Wyglinski, M. Nekovee and Y. T. Hou (Eds), "Cognitive Radio Communications and Networks Principles and Practice," Burlington, MA:Elsevier, 2009.

[39] R. Rom and M. Sidi, "Multiple access protocols performance and analysis," 1st ed., New York, NY: Springer-Verlag, 1990.

[40] 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.

[41] 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, Ju

[42] n. 2007, pp. 574-587.

[43] 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.

[44] J. Riihijarvi, R. Agusti (Eds) et al, "Flexible and spectrum-aware radio acsess 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).

[45] A. Popescu, "Cognitive Radio Networks: Elements and Architectures," Ph.D. dissertation, School of Computing, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden, 2012.

[46] 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.

[47] 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.

[48] 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.

[49] A. Faria, and J.M.C. Brito, “Analyze of throughput incognitive radio networks using slotted aloha”, SBrt. Vol. 12, pp.13-16 Setember 2012.

[50] A. Faria, and J.M.C. Brito, “Average relay in cognitive radio networks using Slotted Aloha”, MIC-CCA. vol.5, pp.12-14, October 2012.

[51] C. Ibe Oliver, Fundamentals of Applied Probability and Random Processes, Elsevier Academic Press, pp. 136-139, 2005.

[52] A. Faria, and J.M.C. Brito, “ A New Throughput Analysis in Cognitive Radio Networks Using Slotted CSMA”,COCORA The Third International Conference on Advances in Cognitive Radio, 2013.