

Inatel

Instituto Nacional de Telecomunicações

Novas Análises da Técnica SHARP
(Spectrum Harvesting with ARQ
Retransmission and Probing) em
Rádio Cognitivo

NÍCOLAS WILSON RIBEIRO ROCHA

AGOSTO/2021

**NOVAS ANÁLISES DA TÉCNICA
SHARP (SPECTRUM HARVESTING
WITH ARQ RETRANSMISSION
AND PROBING) EM RÁDIO
COGNITIVO**

NÍCOLAS WILSON RIBEIRO ROCHA

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Marcos
Câmara Brito

Santa Rita do Sapucaí

2021

Rocha, Nícolas Wilson Ribeiro
R672n
Novas Análises da Técnica SHARP (Spectrum Harvesting With ARQ Retransmission and Probing) em Rádio Cognitivo. / Nícolas Wilson Ribeiro Rocha. – Santa Rita do Sapucaí, 2021.
104 p.

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

1. ARQ 2. Rádio cognitivo 3. Compartilhamento de canal 4. SHARP. 5. CRN. 6. Mestrado em Telecomunicações. I. Brito, José Marcos Câmara. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 03/09/2021,

pela comissão julgadora:

Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito / INATEL

Prof. Dr. Antonio Marcos Alberti / INATEL

Prof. Dr. José Ferreira de Rezende / UFRJ

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

A Deus, minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. José Marcos Câmara Brito pela orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

A todos os colegas, professores e funcionários do Instituto Nacional de Telecomunicações pela amizade.

À minha família pelo carinho e apoio.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1 INTRODUÇÃO	1
2 MODELO SHARP	4
2.1 Modelo do sistema	4
2.2 Regiões de operação.....	6
2.3 Modos de operação	9
2.4 Fluxograma	9
2.5 Análise do <i>throughput</i>	11
2.5.1 Probabilidades das regiões de operação	11
2.5.2 Probabilidade de <i>outage</i>	15
2.5.3 <i>Throughput</i> efetivo.....	15
2.6 Resultados numéricos	16
3 SHARP COM DUAS RETRANSMISSÕES.....	20
3.1 Modelo do sistema	20
3.2 Regiões de operação.....	20

3.3 Modos de operação	24
3.4 Fluxograma	24
3.5 Análise do <i>throughput</i>	26
3.5.1 Probabilidades das regiões de operação	26
3.5.2 Probabilidade de <i>outage</i>	31
3.5.3 <i>Throughput</i> efetivo.....	32
3.6 Resultados numéricos	33
3.7 Conclusão.....	36
4 ANÁLISE DO ATRASO NO MODELO SHARP	38
4.1 Modelo do sistema	38
4.2 Análise do atraso	38
4.5.1 Tempo de transmissão do pacote de dados	39
4.5.2 Tempo de transmissão do pacote ACK.....	39
4.5.3 Tempo de retransmissão.....	39
4.5.4 Tempo de fila	39
4.5.5 Tempo médio de serviço - $EXiA; C$	40
4.5.6 Atraso total do pacote no sistema.....	40
4.6 Usuário primário	40
4.6.1 Tempo médio de serviço primário para cada região de operação.....	40
4.6.2 Tempo médio de serviço primário para o sistema	42
4.6.3 Tempo de fila primário.....	43

4.6.4 Atraso total primário	43
4.7 Usuário secundário.....	43
4.7.1 Tempo médio de serviço secundário para cada região de operação	43
4.7.2 Tempo médio de serviço secundário para o sistema.....	46
4.7.3 Tempo de fila secundário	48
4.7.4 Atraso total secundário.....	48
4.8 Resultados numéricos	48
4.9 Conclusão.....	58
5 SHARP COM ATRASO PARA DUAS RETRANSMISSÕES	59
5.1 Modelo do sistema	59
5.2 Regiões de operação.....	59
5.3 Modos de operação	59
5.4 Fluxograma	59
5.5 Análise do atraso	60
5.6 Usuário primário	60
5.6.1 Tempo médio de serviço primário para cada região de operação.....	60
5.6.2 Tempo médio de serviço primário para o sistema	62
5.6.3 Tempo de fila primário.....	62
5.6.4 Atraso total primário	63
5.7 Usuário secundário.....	63
5.7.1 Tempo médio de serviço secundário para cada região de operação	63

5.7.2 Tempo médio de serviço secundário para o sistema.....	65
5.7.3 Tempo de fila secundário	67
5.7.4 Atraso total secundário.....	67
5.8 Resultados numéricos	67
5.9 Conclusão.....	77
6 CONCLUSÃO	78
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Modelo do sistema SHARP	4
Figura 02 – Plano $g_{11} - g_{21}$ para o modelo SHARP	6
Figura 03 – Fluxograma para o SHARP agressivo	10
Figura 04 – Fluxograma para o SHARP conservador.....	11
Figura 05 – Probabilidade das regiões de operação vs. P_s	17
Figura 06 – Comparação de <i>throughput</i> vs. P_s	18
Figura 07 – Comparação de <i>throughput</i> vs. SIR_{PR}	19
Figura 08 – Plano $g_{11}-g_{21}$ para o SHARP com duas retransmissões	24
Figura 09 – Fluxograma para o SHARP agressivo com duas retransmissões	25
Figura 10 – Fluxograma para o SHARP conservador com duas retransmissões.....	25
Figura 11 – Probabilidade das regiões de operação vs. Potência de transmissão do usuário secundário (P_s)	34
Figura 12 – Comparação de <i>throughput</i> vs. Potência de transmissão do usuário secundário (P_s).....	35
Figura 13 – Comparação de <i>throughput</i> vs. Relação sinal-interferência no receptor primário (SIR_{PR}).....	36
Figura 14 – Atraso total vs. P_s para uma retransmissão primária	50
Figura 15 – Atraso total vs. λ_1 para uma retransmissão primária.....	51
Figura 16 – Atraso total vs. λ_1 para uma retransmissão primária.....	52
Figura 17 – Atraso total vs. l_1 para uma retransmissão primária.....	53
Figura 18 – Atraso total vs. l_2 para uma retransmissão primária.....	54
Figura 19 – Atraso total vs. R_p para uma retransmissão primária	55

Figura 20 – Probabilidade vs. R_p para uma retransmissão primária.....	56
Figura 21 – Atraso total vs. P_p para uma retransmissão primária.....	57
Figura 22 – Probabilidade vs. P_p para uma retransmissão primária.....	58
Figura 23 – Atraso total vs. P_s para duas retransmissões primárias.....	69
Figura 24 – Atraso total vs. λ_1 para duas retransmissões primárias.....	70
Figura 25 – Atraso total vs. λ_2 para duas retransmissões secundárias.....	71
Figura 26 – Atraso total vs. l_1 para duas retransmissões primárias.....	72
Figura 27 – Atraso total vs. l_2 para duas retransmissões primárias.....	73
Figura 28 – Atraso total vs. R_p para duas retransmissões primárias.....	74
Figura 29 – Probabilidade vs. R_p para duas retransmissões primárias.....	75
Figura 30 – Atraso total vs. P_p para duas retransmissões primárias.....	76
Figura 31 – Probabilidade vs. P_p para duas retransmissões primárias.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Validação do cálculo de probabilidades das regiões de operação.....	31
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARQ	- <i>Automatic Repeat Request</i>
SHARP	- <i>Spectrum Harvesting with ARQ Retransmission and Probing in Cognitive Radio</i>
CRN	- <i>Cognitive Radio Network</i>
QoS	- Qualidade de serviço
IOT	- <i>Internet of Things</i>
UP	- Usuário primário
US	- Usuário secundário
ACK	- <i>Acknowledgement</i>
NACK	- <i>Negative acknowledgement</i>
MRC	- Maximum-ratio combining

LISTA DE SÍMBOLOS

- λ_{ij} - média da distribuição exponencial do ganho de canal transmissor i para o receptor j , com índices $i; j$ iguais a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- g_{ij} - ganho do canal do transmissor i para o receptor j , com índices $i; j$ iguais a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- P_p - potência de transmissão do usuário primário em W
- R_p - eficiência espectral nominal do usuário primário em bits/s/Hz
- P_s - potência de transmissão do usuário secundário em W
- R_s - eficiência espectral nominal do usuário secundário em bits/s/Hz
- C - capacidade do canal
- B - banda de transmissão
- SNR - relação nível de sinal sobre o ruído
- γ_p - *threshold* primário
- γ_s - *threshold* secundário
- S_n - região de operação n
- $SINR$ - relação do nível de sinal sobre o ruído e interferência
- N - variância do ruído Gaussiano

- T_0 - tipo de transmissão para o fluxograma do SHARP em que usuário primário transmite novo pacote e usuário secundário permanece em silêncio
- T_1 - tipo de transmissão para o fluxograma do SHARP em que usuário primário repete pacote antigo e usuário secundário permanece em silêncio
- T_2 - tipo de transmissão para o fluxograma do SHARP em que usuário primário transmite novo pacote e usuário secundário também transmite
- T_3 - tipo de transmissão para o fluxograma do SHARP em que usuário primário repete pacote antigo e usuário secundário também transmite
- x_{ij} - variável aleatória com distribuição exponencial, com índices $i; j$ iguais a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- $P\{S_n\}$ - probabilidade de ocorrência da região de operação S_n
- P^{oS} - probabilidade de *outage* do usuário secundário
- G_p^A - throughput efetivo do usuário primário no modo agressivo
- G_s^A - throughput efetivo do usuário secundário no modo agressivo
- G_p^C - throughput efetivo do usuário primário no modo conservador
- G_s^C - throughput efetivo do usuário secundário no modo conservador
- γ_s^* - *threshold* ótimo para o usuário secundário
- W_0 - função W de Lambert para $W \geq -1$
- SIR_{PR} - relação sinal-interferência no receptor primário

- T_{TX_i} - tempo de transmissão do pacote de dados, com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- l_i - tamanho do pacote de dados, com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- T_{ACK_i} - tempo de transmissão do pacote ACK, com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- l_{ACK_i} - tamanho do pacote ACK, com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- T_{RTX_i} - tempo de retransmissão do pacote, com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- λ_i - taxa de geração de pacotes na fila do usuário i da distribuição de Poisson, com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- ρ_i - utilização do canal do usuário i , com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- X_i - variável aleatória que representa o tempo necessário para a correta transmissão do pacote do usuário i , com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário
- $E[X_i]_{A,C}$ - primeiro momento da variável aleatória X_i , com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário

$E[X_i^2]_{A;C}$ - segundo momento da variável aleatória X_i , com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário

$T_{W_{iA;C}}$ - tempo de fila, com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário e índices A para o modo agressivo e C para o modo conservador

$T_{Q_{iA;C}}$ - atraso total do pacote no sistema do usuário i , com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário e índices A para o modo agressivo e C para o modo conservador

$E[X_i]_{S_j A;C}$ - primeiro momento da variável aleatória X_i , com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário, índice j igual à região de operação e índices A para o modo agressivo e C para o modo conservador

$T_{W_{iS_j A;C}}$ - tempo de fila, com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário, índice j igual à região de operação e índices A para o modo agressivo e C para o modo conservador

$\alpha_{S_j A;C}$ - constante para representar o número de transmissões necessárias de cada pacote transmitido corretamente em determinada região de operação, com índice j igual à região de operação e índices A para o modo agressivo e C para o modo conservador

$E[X_i^2]_{S_j A;C}$ - segundo momento da variável aleatória X_i , com índice i igual a 1 para usuário primário e 2 para usuário secundário, índice j igual à região de operação e índices A para o modo agressivo e C para o modo conservador

- σ^2 - variância do comprimento do pacote
- $\alpha_{A;C}$ - constante para representar o número de transmissões necessárias de cada pacote transmitido corretamente, com índices A para o modo agressivo e C para o modo conservador
- $\beta_{A;C}$ - constante auxiliar relacionada a $\alpha_{S_j A;C}$, com índices A para o modo agressivo e C para o modo conservador
- N_r - número de retransmissões secundárias

RESUMO

Rádio cognitivo consiste em uma nova tecnologia de comunicação à qual procura por canais disponíveis e permite novas oportunidades de transmissão para usuários coexistentes, otimizando o espectro e aumentando a eficiência de comunicações sem fio. Este trabalho propõe análises adicionais e extensões do método chamado *Spectrum Harvesting with ARQ Retransmission and Probing (SHARP)*, uma técnica de rádio cognitivo em que usuários primários e secundários coexistem, sendo que este último observa o retorno da solicitação de repetição automática (ARQ) do receptor primário a fim de obter informações sobre o canal primário e amostrá-lo, conseguindo dados adicionais sobre o nível do ganho dos canais direto e cruzado. Este mecanismo de amostragem e dois modos de compartilhamento de espectro – agressivo e conservador – são usados dependendo da interferência aceitável provocada pelo usuário secundário sobre o usuário primário. O estudo foca em dois aspectos principais: permitir a possibilidade de mais retransmissões no sistema original e observar os efeitos do atraso no modelo. Novas regiões de operação para o sistema são derivadas e suas probabilidades calculadas. O *throughput* das transmissões e o atraso no sistema são calculados. Resultados numéricos apresentam a influência no desempenho do sistema ao aumentar o número de retransmissões e a importância de considerar o atraso em sua análise.

Palavras-chave: ARQ, rádio cognitivo, compartilhamento de canal, atraso, SHARP, CRN

ABSTRACT

Cognitive radio consists in a new technology that searches for available channels and allows new transmissions opportunities for coexisting users, optimizing the spectrum usage and increasing wireless communications efficiency. This work proposes additional analysis and extensions of the method entitled Spectrum Harvesting with ARQ Retransmission and Probing (SHARP), a cognitive radio network technique in which primary and secondary users coexist. The secondary pair listens to the primary receptor Automatic Repeat Request (ARQ) feedback in order to glean information about the primary channel and probe it, getting additional data of the direct and cross channel gains. This probing mechanism and two varieties of spectrum sharing, named conservative and aggressive SHARP, are used depending on the desired secondary user interference in the primary. The study focuses in two main aspects: allowing more retransmission possibilities in the original system and observing the delay effects in the model. New operating regions and their probabilities are derived. The transmissions throughput and the system delay are calculated. Numerical results shows the influence in the system performance by increasing the number of retransmissions and the importance of considering the delay in its analysis.

Keywords: ARQ, cognitive radio, spectrum sharing, delay, SHARP, CRN.

1 INTRODUÇÃO

A indústria de comunicações enfrenta atualmente um enorme desafio para desenvolver novas soluções com qualidade de serviço (QoS) cada vez melhor, preocupada com a sustentabilidade em termos de eficiência energética e espectral. A crescente demanda por dispositivos sem fio acende o alerta para a necessidade do uso inteligente do limitado espectro de frequências disponível. O rádio cognitivo surgiu como proposta para otimizar a utilização do espectro eletromagnético, direcionando o tráfego de dados para canais de transmissão ociosos.

Rádio cognitivo consiste em uma forma de comunicação sem fio na qual o *transceiver* – dispositivo utilizado para transmitir e/ou receber sinais - detecta de forma inteligente espaços de tempo com canais disponíveis para uso e cria novas oportunidades de transmissão, movendo o tráfego para canais mais livres e melhorando a eficiência do sistema.

Dentro da concepção de rádio cognitivo são definidos o usuário primário, o qual detém a prioridade na transmissão e uso do canal, e o usuário secundário, que possui menor prioridade e explora cenários possíveis para transmissão. Ambos coexistem no sistema e o modelo de rádio cognitivo utilizado determina como serão as transmissões. Além disso, em particular para as análises feitas nesta dissertação, dois modos principais de operação podem ser definidos: o modo agressivo no qual o usuário secundário pode transmitir sempre que possível, porém sem levar o usuário primário ao *outage*, e o modo conservador, em que o usuário secundário não pode transmitir caso influencie de qualquer modo nas transmissões primárias.

A principal vantagem do rádio cognitivo é permitir que usuários secundários ocupem os canais ociosos, otimizando o uso do espectro de frequência e contribuindo para se obter níveis adequados de qualidade de serviço, além de permitir a coexistência de usuários primários e secundários. Haykin ressalta a importância do uso de técnicas de rádio cognitivo como fator decisivo para melhorar a eficiência de comunicações sem fio [1].

As aplicações beneficiadas com o rádio cognitivo são inúmeras. Mu et al. utilizam técnicas de rádio cognitivo a fim de coletar informações do espectro para determinar posições de seres humanos em ambientes fechados [2]. Wang & Liu relatam em detalhes os avanços neste setor e citam exemplos na área de comunicações militares e segurança pública [3]. Wang J. et al. mencionam aplicações em *smart grid*, rede móvel celular e até mesmo medicina [4]. López-Benítez mostra outras aplicações em comunicações por satélite e outros sistemas de comunicação sem fio [5], enquanto Felker cita Internet das Coisas (IoT) e *Machine Learning* [6]. Os resultados apresentados nesta dissertação aplicam-se a uma técnica específica de rádio cognitivo, porém abrangem aplicações de forma geral.

Um requisito fundamental para o correto funcionamento do rádio cognitivo é a capacidade de perceber a utilização do canal de transmissão pelos usuários primários no ambiente e acrescentar usuários secundários com o mínimo de interferência adicional no sistema. Os problemas práticos e teóricos envolvendo rádio cognitivo têm se mostrado desafiadores, assim como as técnicas utilizadas. Zhao & Sadler resumem alguns resultados sobre compartilhamento dinâmico de espectro, no qual a alocação de frequência varia conforme o tráfego espacial e temporal dos diferentes serviços [7]. Yucek & Arslan apresentam algoritmos de sensoriamento utilizados, citando suas aplicações e vantagens [8]. Chandwani et al. comentam o desempenho da rede comparando o *throughput* para diferentes condições de interferência [9]. Park et al. exploram técnicas de detecção de canais livres e relevantes para comunicação [10]. Barnawi propõe um novo método para sensoriamento do canal utilizando técnicas de espalhamento espectral [11]. Zareei M. et al. discutem um mecanismo de controle de potência de transmissão para redes de rádios cognitivos de forma a maximizar o uso de energia [12]. Khan et al. otimizam o agendamento de tráfego para redes de rádio cognitivo [13]. Por fim, Hattab & Ibnkahla mostram o futuro promissor das técnicas de rádio cognitivo, citando a habilidade de observar grandes faixas de frequência de forma rápida e eficiente, aumentando a descoberta oportuna de novos canais disponíveis para transmissão [14].

Em geral, as informações do estado do canal não estão diretamente disponíveis para o usuário secundário. A redundância presente nos processos de *loop* de

transmissões primárias, principalmente em pacotes de *feedback* e controle de potência, começou a ser explorada para rádio cognitivo, em especial referente aos protocolos de retransmissão ARQ (*Automatic Repeat Request*). Neste cenário, Li et al. introduziram o SHARP (*Spectrum Harvesting with ARQ Retransmission and Probing in Cognitive Radio*), um método de rádio cognitivo em que os usuários secundários (US) observam o *feedback* das retransmissões ARQ de usuários primários (UP), obtendo informações sobre o canal primário sem comprometer a privacidade dos dados e encontrando possíveis oportunidades de transmissão. Nesta técnica são definidas regiões de operação – compostas pelas probabilidades de sucessos nas transmissões levando-se em conta o canal de transmissão e interferências – e, com base nelas, define-se um algoritmo para controlar as transmissões de usuários secundários. É utilizado um modelo com apenas uma retransmissão disponível e o *throughput* efetivo é calculado para diferentes cenários possíveis [15]. Visando estender as análises para o modelo em questão, esta dissertação aborda novos aspectos, como investigar a influência de um maior número de retransmissões no desempenho do sistema e considerar um novo parâmetro de desempenho, o atraso para transmissão de um pacote.

Os resultados das novas análises realizadas nesta dissertação foram publicados nos dois artigos a seguir:

1. ROCHA, N. W. R., BRITO, J. M. C; Extending the Performance Analysis of SHARP - Spectrum Harvesting with ARQ Retransmission and Probing in Cognitive Radio. *IT Convergence and Security*, v. 712, pages 77-88, Springer, Singapore, 2020.
2. ROCHA, N. W. R., BRITO, J. M. C; Delay Analysis of SHARP – Spectrum Harvesting with ARQ Retransmission and Probing in Cognitive Radio. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBRT 2020. Brazil, 2020. DOI: 10.14209/SBRT.2020.1570658472.

O restante da dissertação está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 apresenta-se o modelo SHARP. No Capítulo 3 analisa-se um novo modelo com duas retransmissões possíveis, citando as mudanças e implicações ocorridas, além dos resultados obtidos. Os Capítulos 4 e 5 introduzem o atraso como nova variável de estudo no modelo SHARP original, com novos resultados apresentados. Finalmente, no Capítulo 6 são mostradas as conclusões obtidas e possíveis trabalhos futuros.

2 MODELO SHARP

O método SHARP apresentado por Li et al. [15] foi desenvolvido para funcionar como uma técnica de rádio cognitivo em que o usuário secundário obtém informações do canal principal observando as transmissões ARQ do usuário primário.

2.1 Modelo do sistema

O modelo do sistema é apresentado na Figura 01. O transmissor primário ocupa o canal durante todo o tempo, enquanto que o secundário o utiliza somente através de compartilhamento de espectro. Os ganhos do canal seguem uma distribuição exponencial com média λ e são representados por g_{ij} do transmissor i para o receptor j , onde o subscrito 1 indica o usuário primário e 2 denota o usuário secundário. O canal é considerado de desvanecimento lento, no qual o ganho do canal permanece aproximadamente constante em muitos intervalos de transmissões, mas pode mudar em uma escala maior de tempo.

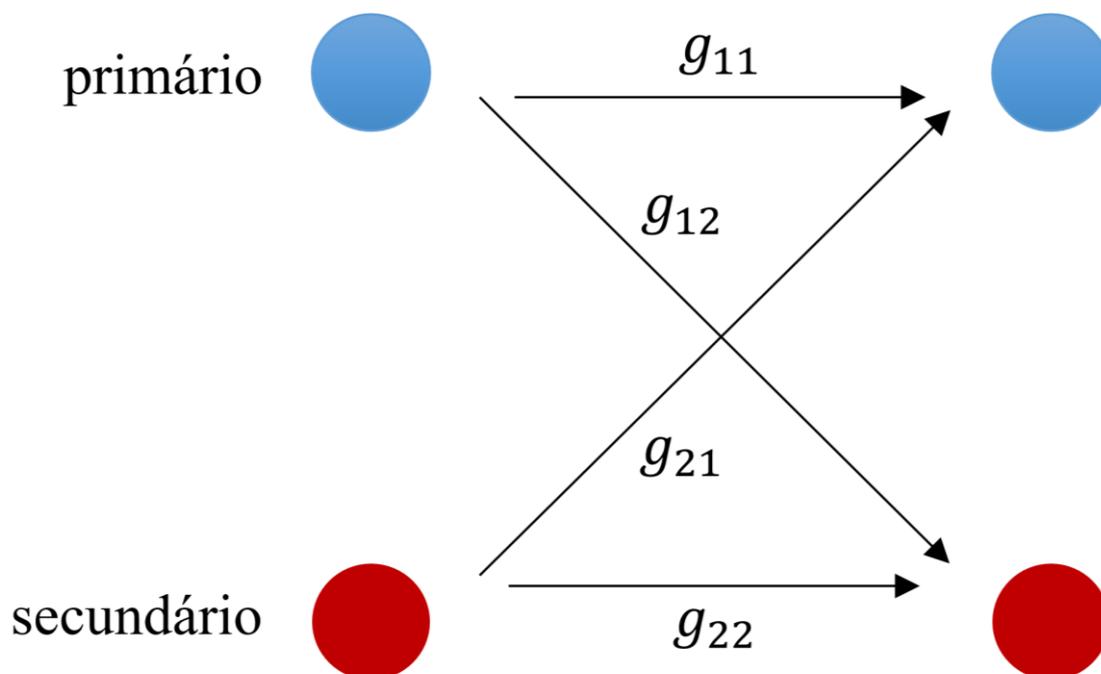


Figura 01 – Modelo do sistema SHARP

O usuário primário transmite em uma potência de saída constante P_p (W) e com eficiência espectral nominal de R_p ($bits/s/Hz$). Caso a primeira transmissão nesta taxa e potência não seja bem-sucedida, o mesmo pacote é retransmitido e os dois pacotes são combinados no receptor. Após duas transmissões sem sucesso, o primário descarta o pacote atual e segue para o próximo. O usuário secundário, sempre que ativo, transmite a uma potência constante P_s (W), e com eficiência espectral nominal de R_s ($bits/s/Hz$). As transmissões secundárias não geram pacote ARQ.

A ideia básica do SHARP é explorar possíveis oportunidades de transmissão para o usuário secundário, evitando sempre *outage* no primário. Infelizmente, o estado do canal não está disponível diretamente para o secundário por razões práticas. Um algoritmo de detecção do canal é então realizado, observando-se os pacotes ACK/NACK transmitidos pelo receptor primário quando o secundário realiza ou não transmissões a fim de determinar como sua interferência influencia no usuário primário.

Oportunidades de transmissão para o secundário são definidas pelas transmissões primárias e dependem da relação entre o ganho do canal direto (g_{11}) e do canal cruzado (g_{21}). O plano g_{11} - g_{21} ilustrado na Figura 02 mostra as diferentes janelas de transmissão para o secundário de acordo com o ganho do canal primário (g_{11}) e o nível de interferência do secundário no receptor primário (g_{21}). Os *thresholds* que indicam o sucesso de uma transmissão para o primário e secundário são dados pelo teorema de Shannon-Hartley, o qual determina a taxa máxima na qual as informações podem ser transmitidas através de um canal de comunicação com uma determinada largura de banda na presença de ruído:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

em que C representa a capacidade do canal, B é a largura de banda do canal e SNR é a relação sinal-ruído do sinal recebido.

Trabalhando com esta equação, pode-se chegar ao cálculo da relação sinal-ruído do sinal recebido em função de sua eficiência espectral nominal:

$$\gamma = SNR = 2^{\frac{C}{B}} - 1 = 2^R - 1 \quad (2)$$

Logo, os *thresholds* primário e secundário são respectivamente $\gamma_p \triangleq 2^{R_p} - 1$ e $\gamma_s \triangleq 2^{R_s} - 1$.

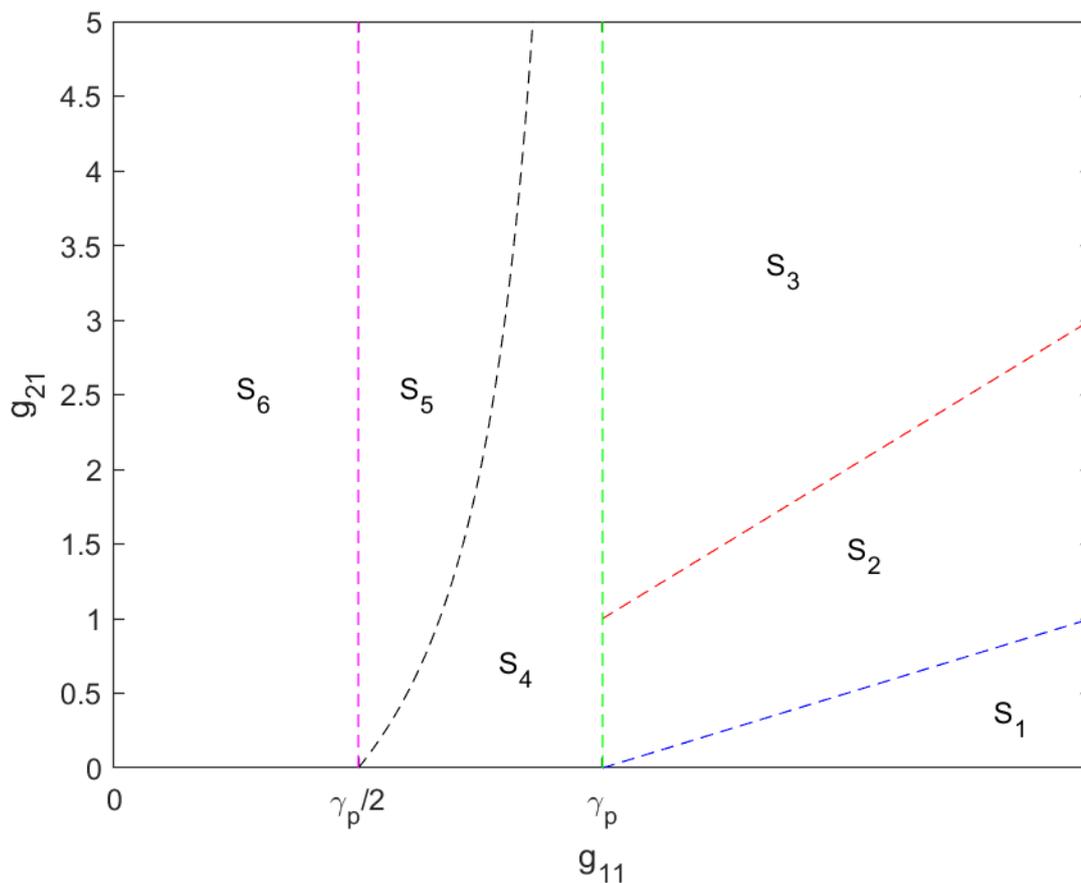


Figura 02 – Plano g_{11} - g_{21} para o modelo SHARP

2.2 Regiões de operação

As regiões de operação (S_1 - S_6) consistem nos possíveis cenários em que o usuário primário se encontra e podem ser observadas na Figura 02. São definidas utilizando a relação nível de sinal sobre o ruído e interferência (*SINR*) e a relação nível de sinal sobre o ruído (*SNR*) como parâmetros, em conjunto com o *threshold* primário (γ_p), para determinar o sucesso de uma transmissão.

As equações das duas relações estão a seguir:

$$SINR = \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} \quad (3)$$

$$SNR = \frac{P_p g_{11}}{N} \quad (4)$$

em que $P_p g_{11}$, $P_s g_{21}$ e N representam o nível de sinal, o nível de interferência e o nível de ruído recebidos no receptor primário, respectivamente. Uma transmissão é considerada bem sucedida caso as relações nível de sinal sobre o ruído e interferência ($SINR$) e a relação nível de sinal sobre o ruído (SNR) sejam superiores ao *threshold* primário (γ_p).

No receptor é utilizado um método bem difundido em telecomunicações conhecido como *maximum-ratio combining* (MRC) [16], no qual os sinais provenientes das transmissões e retransmissões são recebidos e combinados de forma que o sinal resultante possua SNR correspondente à soma das $SNRs$ individuais de cada transmissão.

A seguir detalha-se a definição de cada região de operação:

1. O canal primário suporta a taxa em uma transmissão apesar da interferência do secundário. É o melhor cenário possível. Sob esta condição, o secundário pode sempre transmitir.

$$\frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} > \gamma_p \quad (5)$$

2. O canal primário suporta a taxa em uma transmissão sem interferência, porém são necessárias duas transmissões para obter sucesso na presença de interferência. Sob esta condição, o secundário transmite sem causar *outage* no primário, porém diminuindo o *throughput* efetivo deste.

$$\frac{\gamma_p}{2} < \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} < \gamma_p \quad (6)$$

$$\frac{P_p g_{11}}{N} > \gamma_p \quad (7)$$

3. O canal primário suporta a taxa em uma transmissão sem interferência. Na presença de interferência não obtém sucesso nem com duas transmissões. Desta forma, o secundário transmite uma vez a cada duas transmissões primárias sem causar *outage* no primário, mas diminuindo o *throughput* efetivo deste.

$$\frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} < \frac{\gamma_p}{2} \quad (8)$$

$$\frac{P_p g_{11}}{N} > \gamma_p \quad (9)$$

4. O canal primário suporta a taxa em duas transmissões sem interferência. Também é obtido sucesso se a cada duas transmissões, uma esteja livre de interferências. Sob esta condição, o secundário pode transmitir uma vez a cada duas transmissões primárias sem causar *outage* no primário ou diminuir o *throughput* efetivo deste.

$$\frac{P_p g_{11}}{N} + \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} > \gamma_p \quad (10)$$

$$\frac{\gamma_p}{2} < \frac{P_p g_{11}}{N} < \gamma_p \quad (11)$$

5. O canal primário suporta a taxa em duas transmissões sem interferência. Não é obtido sucesso com qualquer interferência secundária. Sob esta condição, o secundário deve permanecer em silêncio.

$$\frac{P_p g_{11}}{N} + \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} < \gamma_p \quad (12)$$

$$\frac{P_p g_{11}}{N} > \frac{\gamma_p}{2} \quad (13)$$

6. O ganho de canal primário está muito baixo e não é possível sucesso nem em duas transmissões sem interferência. O usuário primário encontra-se em *outage*. Sob esta condição, o secundário pode transmitir sempre.

$$\frac{P_p g_{11}}{N} < \frac{\gamma_p}{2} \quad (14)$$

2.3 Modos de operação

É definido também para o SHARP dois modos de operação: o modo agressivo e o conservador, que diferem basicamente nas permissões para o usuário secundário utilizar o canal. Enquanto o primeiro permite que o secundário transmita sempre que possível, o segundo admite transmissões do secundário apenas nos casos em que não ocorra nenhum tipo de degradação no desempenho do usuário primário. Em ambos os casos, o usuário secundário não pode causar *outage* no primário.

2.4 Fluxograma

O algoritmo de detecção da região de operação segue um fluxograma bem definido. Consiste em amostrar o canal nas primeiras transmissões, observando os pacotes ACK/NACK do receptor primário e descobrir, de acordo com o nível de sucesso, em qual região os transmissores se encontram.

Existem quatro tipos de transmissões:

$T_0 = \{\text{primário transmite novo pacote; secundário em silêncio}\}$

$T_1 = \{\text{primário repete pacote antigo; secundário em silêncio}\}$

$T_2 = \{\text{primário transmite novo pacote; secundário transmite}\}$

$T_3 = \{\text{primário repete pacote antigo; secundário transmite}\}$

Utilizando a notação acima, o mecanismo de descoberta da região de operação pelo usuário secundário é relativamente simples. O algoritmo começa na raiz da árvore e avança até as folhas, de forma que, durante o processo, o usuário secundário realiza transmissões testes e observa os pacotes ACK/NACK do receptor primário. De acordo com o resultado das transmissões, determina-se em qual região se encontra. Após isto, o sistema permanece nesta região até que as condições do canal se alterem. É válido destacar que esta rotina de detecção requer que o usuário secundário refaça periodicamente a amostragem do canal.

São apresentadas nas Figuras 03 e 04, respectivamente, as árvores de possibilidades para o funcionamento do sistema nos modos agressivo e conservador:

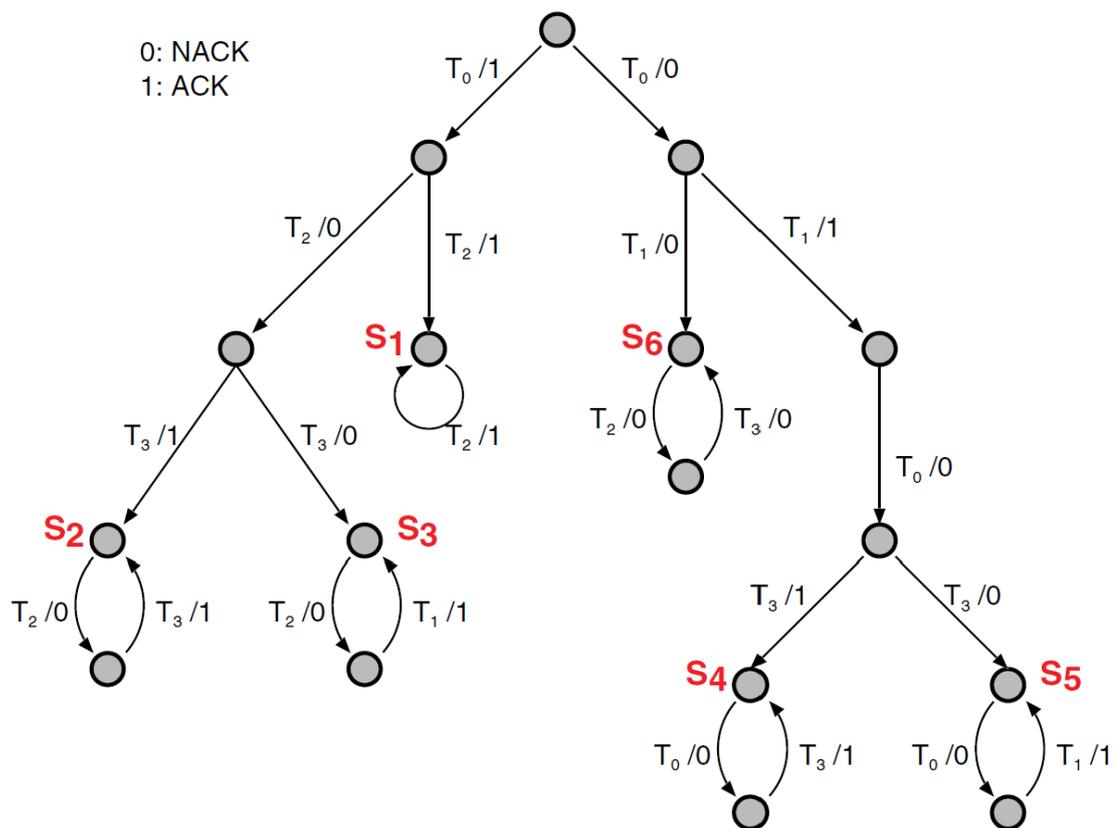


Figura 03 – Fluxograma para o SHARP agressivo

Para o modo conservador, as regiões S_2 e S_3 do modo agressivo foram unidas em uma mesma região de operação S_2' devido ao fato de a transmissão secundária apresentar degradação no *throughput* efetivo do usuário primário. Nesta região, não é permitido transmissão secundária.

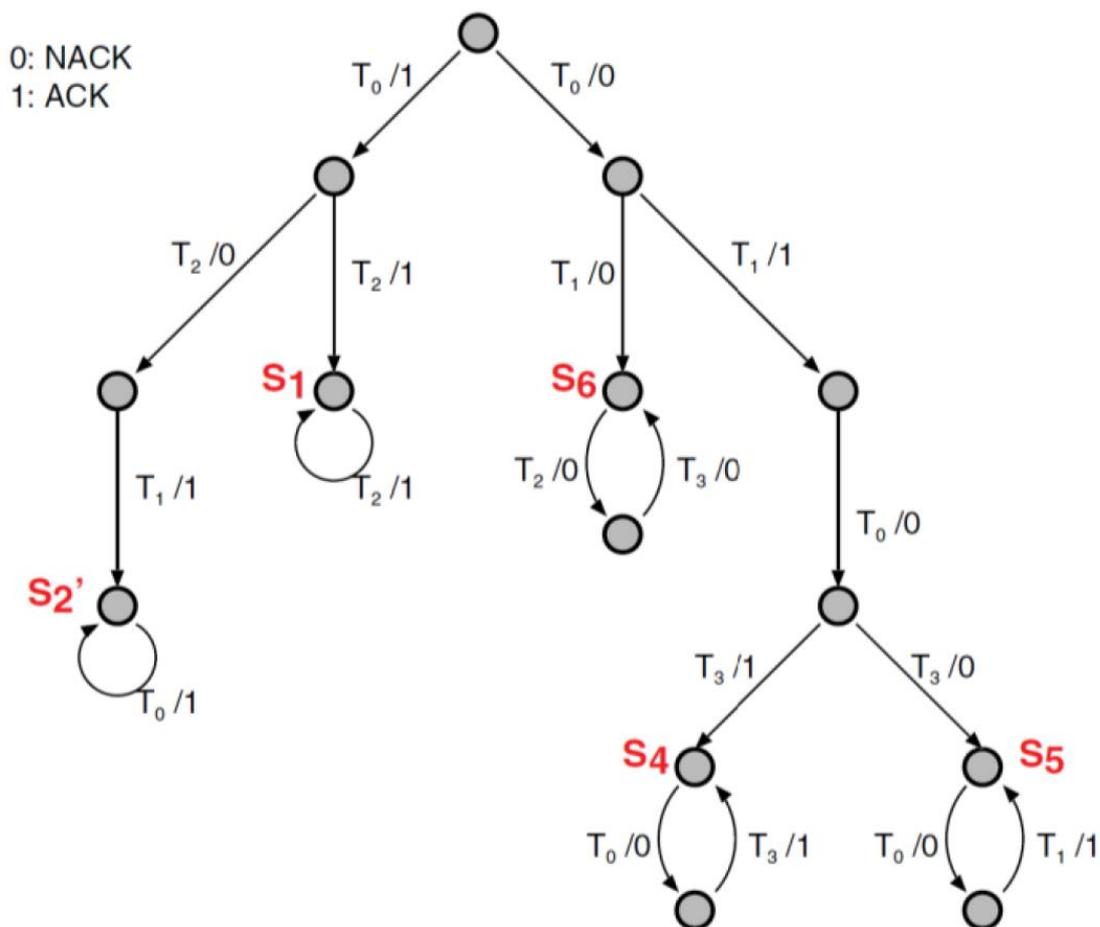


Figura 04 – Fluxograma para o SHARP conservador

2.5 Análise do *throughput*

Resultados analíticos [15] são apresentados nesta seção para os modos agressivo e conservador do SHARP. As probabilidades das regiões de operação são calculadas com base nos limites de *threshold*. A probabilidade de *outage* para os usuários primário e secundário também é apresentada. Finalmente, o *throughput* de ambos os usuários é encontrado.

2.5.1 Probabilidades das regiões de operação

Por simplicidade, as premissas abaixo são utilizadas:

1. O ruído de fundo N é igual a 1;

2. O ganho do canal é composto pelo valor médio λ_{ij} e a variável aleatória x_{ij} , ou seja, $g_{11} \triangleq \lambda_{11}x_{11}$ e $g_{21} \triangleq \lambda_{21}x_{21}$, em que x_{11}, x_{21} seguem uma distribuição exponencial de média unitária. Estas decomposições são bem comuns em comunicações sem fio pela conveniência em se analisar de forma isolada o efeito do desvanecimento em pequena escala.

As deduções detalhadas abaixo são parte da contribuição desta dissertação.

Primeiramente, a probabilidade de S_1 pode ser encontrada por:

$$\begin{aligned}
 P\{S_1\} &= P\left\{\frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} \geq \gamma_p\right\} = P\left\{x_{11} \geq \frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}\right\} \\
 &= 1 - F\left(\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}\right) = e^{-\gamma_p \frac{(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}} \\
 &= \int_0^\infty \left[e^{-\gamma_p \frac{(1 + P_s \lambda_{21} y)}{\lambda_{11} P_p}} e^{-y} \right] dy = \frac{\lambda_{11} P_p \gamma_p e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}}}{P_s \lambda_{21} \gamma_p + \lambda_{11} P_p}
 \end{aligned} \tag{15}$$

A probabilidade da região combinada $S_2' = S_2 \cup S_3$ é:

$$\begin{aligned}
 P\{S_2'\} &= P\left\{P_p g_{11} \geq \gamma_p, \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} < \gamma_p\right\} \\
 &= P\left\{\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p} \leq x_{11} \leq \frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}\right\} \\
 &= F\left(\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}\right) - F\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}\right) \\
 &= e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}} \\
 &= \int_0^\infty \left[e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}} - e^{-\gamma_p \left(\frac{1 + P_s \lambda_{21} y}{\lambda_{11} P_p}\right)} \right] e^{-y} dy \\
 &= \frac{\lambda_{21} P_s \gamma_p e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}}}{P_s \lambda_{21} \gamma_p + \lambda_{11} P_p}
 \end{aligned} \tag{16}$$

A probabilidade de S_3 é:

$$\begin{aligned}
P\{S_3\} &= P\left\{P_p g_{11} \geq \gamma_p, \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} < \frac{\gamma_p}{2}\right\} \\
&= P\left\{\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p} \leq x_{11} \leq \frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{2\lambda_{11} P_p}\right\} \\
&= F\left(\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{2\lambda_{11} P_p}\right) - F\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}\right) \\
&= e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{2\lambda_{11} P_p}} \\
&= \int_{\frac{1}{P_s \lambda_{21}}}^{\infty} \left[e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} y)}{2\lambda_{11} P_p}} \right] e^{-y} dy \\
&= \frac{\lambda_{21} P_s \gamma_p e^{-\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p} + \frac{1}{\lambda_{21} P_s}\right)}}{P_s \lambda_{21} \gamma_p + 2\lambda_{11} P_p}
\end{aligned} \tag{17}$$

em que o limite inferior da integral é definido de forma a satisfazer a desigualdade:

$$\begin{aligned}
\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p} \leq x_{11} \leq \frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{2\lambda_{11} P_p} &\leftrightarrow 2 \leq 1 + P_s \lambda_{21} x_{21} \\
x_{21} &\geq \frac{1}{P_s \lambda_{21}}
\end{aligned} \tag{18}$$

Logo, tem-se a probabilidade de S_2 :

$$\begin{aligned}
P\{S_2\} &= P\{S_2'\} - P\{S_3\} \\
&= \frac{\lambda_{21} P_s \gamma_p e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}}}{P_s \lambda_{21} \gamma_p + \lambda_{11} P_p} - \frac{\lambda_{21} P_s \gamma_p e^{-\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p} + \frac{1}{\lambda_{21} P_s}\right)}}{P_s \lambda_{21} \gamma_p + 2\lambda_{11} P_p}
\end{aligned} \tag{19}$$

A probabilidade da região combinada $S_4 \cup S_5$ é:

$$\begin{aligned}
P\{S_4 \cup S_5\} &= P\left\{P_p g_{11} \geq \frac{\gamma_p}{2}, P_p g_{11} < \gamma_p\right\} \\
&= P\left\{\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11} P_p} \leq x_{11} < \frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}\right\} \\
&= F\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}\right) - F\left(\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11} P_p}\right) e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11} P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}}
\end{aligned} \tag{20}$$

A probabilidade de S_5 é:

$$\begin{aligned}
P\{S_5\} &= P\left\{P_p g_{11} \geq \frac{\gamma_p}{2}, P_p g_{11} + \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} < \gamma_p\right\} \\
&= P\left\{\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p} \leq x_{11} < \frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 2}\right)\right\} \\
&= F\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 2}\right)\right) - F\left(\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}\right) \\
&= e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 2}\right)} \\
&= \int_0^\infty \left[e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{1+P_s \lambda_{21} t}{2+\lambda_{21} P_s t}\right)} \right] e^{-t} dt \\
&= e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}} - \left(e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p}} \right) \Phi\left(\lambda_{21} P_s, \frac{\lambda_{11} P_p}{\gamma_p}\right)
\end{aligned} \tag{21}$$

em que $\Phi(y, z) \triangleq \int_0^\infty \left[e^{\frac{1}{(2+yt)z}} - e^{-t} \right] dt$

Assim, tem-se a probabilidade de S_4 :

$$\begin{aligned}
P\{S_4\} &= P\{S_4 \cup S_5\} - P\{S_5\} \\
&= e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p}} \left(\Phi\left(\lambda_{21} P_s, \frac{\lambda_{11} P_p}{\gamma_p}\right) - 1 \right)
\end{aligned} \tag{22}$$

A probabilidade de S_6 é dada por:

$$\begin{aligned}
P\{S_6\} &= P\left\{P_p g_{11} \leq \frac{\gamma_p}{2}\right\} = P\left\{x_{11} \leq \frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}\right\} \\
&= F\left(\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}\right) = 1 - e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}}
\end{aligned} \tag{23}$$

2.5.2 Probabilidade de *outage*

Através das equações anteriores pode-se perceber que não existe *outage* primário nas regiões S_1 - S_5 , enquanto que em S_6 as transmissões primárias não obtêm sucesso em nenhum momento. Assim sendo, a probabilidade de *outage* para o usuário primário nos modos conservador e agressivo é igual a $P\{S_6\}$.

Para o usuário secundário, considera-se que a interferência do usuário primário é perfeitamente cancelada no receptor secundário. Este resultado é baseado na premissa de que o receptor secundário está localizado muito distante do transmissor primário (*nível de interferência* = $g_{12}P_p \approx 0$) ou muito próximo, de forma que consiga identificar e cancelar a interferência. Assim sendo, leva-se em consideração somente a *SNR* do sinal presente no receptor secundário. A probabilidade de *outage* corresponde a uma *SNR* inferior a γ_s , dada por:

$$P^{OS} = P\left\{\frac{P_s g_{22}}{N} < \gamma_s\right\} = P\left\{x_{22} < \frac{\gamma_s}{P_s \lambda_{22}}\right\} = 1 - e^{-\frac{\gamma_s}{\lambda_{22} P_s}} \quad (24)$$

2.5.3 *Throughput* efetivo

O *throughput* efetivo para os modos agressivo e conservador são dependentes da região na qual os usuários primário e secundário estão operando devido às diferentes oportunidades de transmissão possíveis em cada caso. É calculado utilizando-se das probabilidades de ocorrência de cada região, bem como o *throughput* de cada região [15].

Observa-se nos fluxogramas das Figuras 03 e 04 que em cada região de operação há um *throughput* relacionado às transmissões e retransmissões realizadas. Por exemplo, em S_1 não há retransmissões para os usuários primário e secundário e, portanto, considera-se valores de *throughput* iguais a R_p e R_s , respectivamente. Já em regiões de operação em que necessitam-se de retransmissões, o *throughput* reduz para $\frac{R_p}{2}$, como em S_1 , no caso do usuário primário, ou para $\frac{R_s}{2}$, como em S_3 , no caso do usuário secundário. O número de retransmissões afeta diretamente o *throughput* das regiões de operação.

Para o SHARP agressivo, o *throughput* primário e secundário são:

$$G_p^A = \left[R_p P\{S_1\} + \frac{R_p}{2} (P\{S_2\} + P\{S_3\} + P\{S_4\} + P\{S_5\}) \right] \quad (25)$$

$$G_s^A = \left[R_s (P\{S_1\} + P\{S_2\} + P\{S_6\}) + \frac{R_s}{2} (P\{S_3\} + P\{S_4\}) \right] (1 - P^{OS}) \quad (26)$$

Para o SHARP conservador:

$$G_p^C = \left[R_p (P\{S_1\} + P\{S_2'\}) + \frac{R_p}{2} (P\{S_4\} + P\{S_5\}) \right] \quad (27)$$

$$G_s^C = [R_s (P\{S_1\} + P\{S_6\}) + \frac{R_s}{2} P\{S_4\}] (1 - P^{OS}) \quad (28)$$

Existe um *threshold* ótimo (γ_s^*) no qual o *throughput* secundário é otimizado. É calculado obtendo-se a primeira derivada com relação ao *threshold* de *outage* e igualando-a a zero [15]:

$$\max(R_s(1 - P^{OS})) \rightarrow \frac{d(R_s(1 - P^{OS}))}{d\gamma_s} = 0 \quad (29)$$

$$\gamma_s^* = \frac{\lambda_{22} P_s}{W_0(\lambda_{22} P_s)} - 1 \quad (30)$$

em que W_0 denota a função W de Lambert para $W \geq -1$.

2.6 Resultados numéricos

Nesta seção apresentam-se os resultados numéricos encontrados pelos autores Li et al. para o modelo SHARP [15]. Foi considerado que todos os canais (primário, secundário e enlace cruzado) seguem uma distribuição *Rayleigh* e, caso não seja mencionado, a potência de transmissão primária e secundária, assim como a variância do ruído Gaussiano N , são, por definição, iguais à unidade.

O primeiro resultado, ilustrado na Figura 05, mostra como a probabilidade em cada região de operação muda de acordo com a potência de transmissão do usuário secundário (P_s).

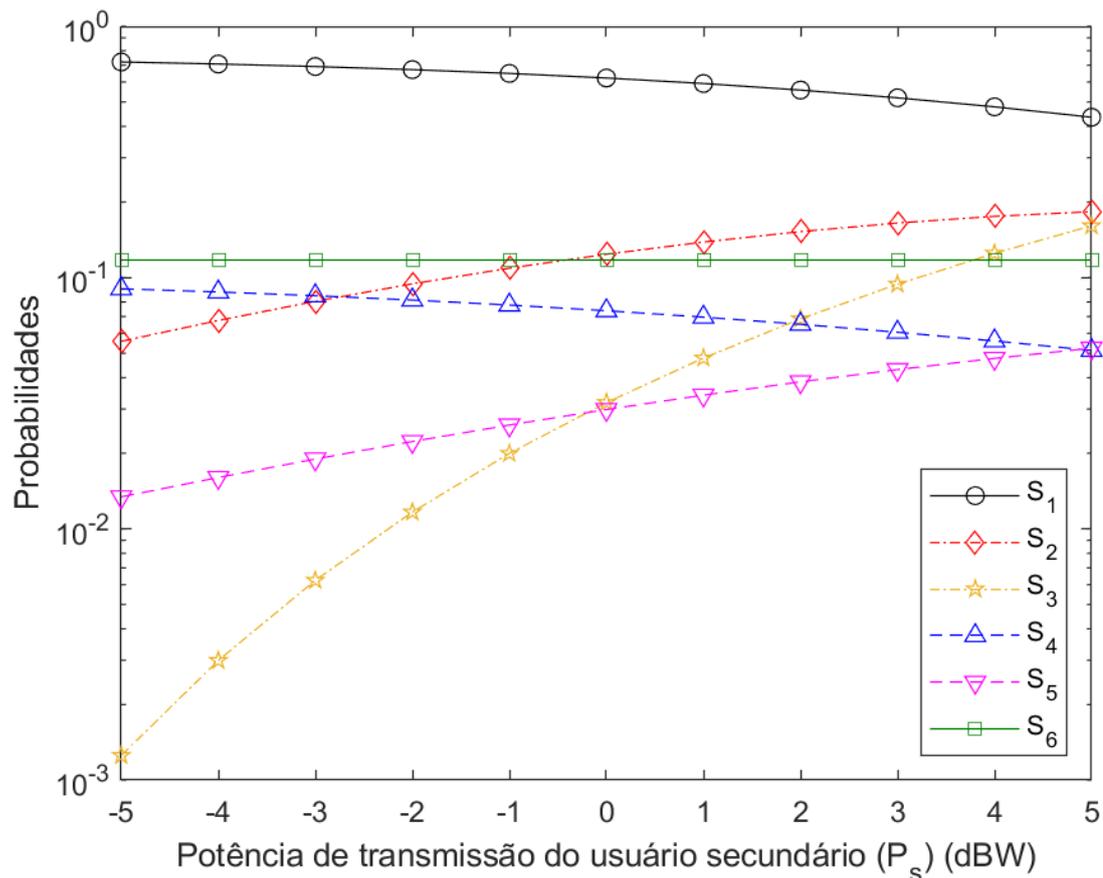


Figura 05 – Probabilidade das regiões de operação vs. P_s

A Figura 06 contém o *throughput* efetivo para o SHARP agressivo e conservador para duas transmissões, variando-se a potência de transmissão secundária. As eficiências espectrais nominais primária (R_p) e secundária (R_s) são iguais a 1 e 0.5 respectivamente e os ganhos de canal primário (λ_{11}) e secundário (λ_{22}) são iguais a 4, enquanto que o enlace cruzado (λ_{21}) é igual a 1. Na legenda, 1RTX significa que foi permitido uma retransmissão (transmissão original mais uma retransmissão adicional, totalizando duas transmissões).

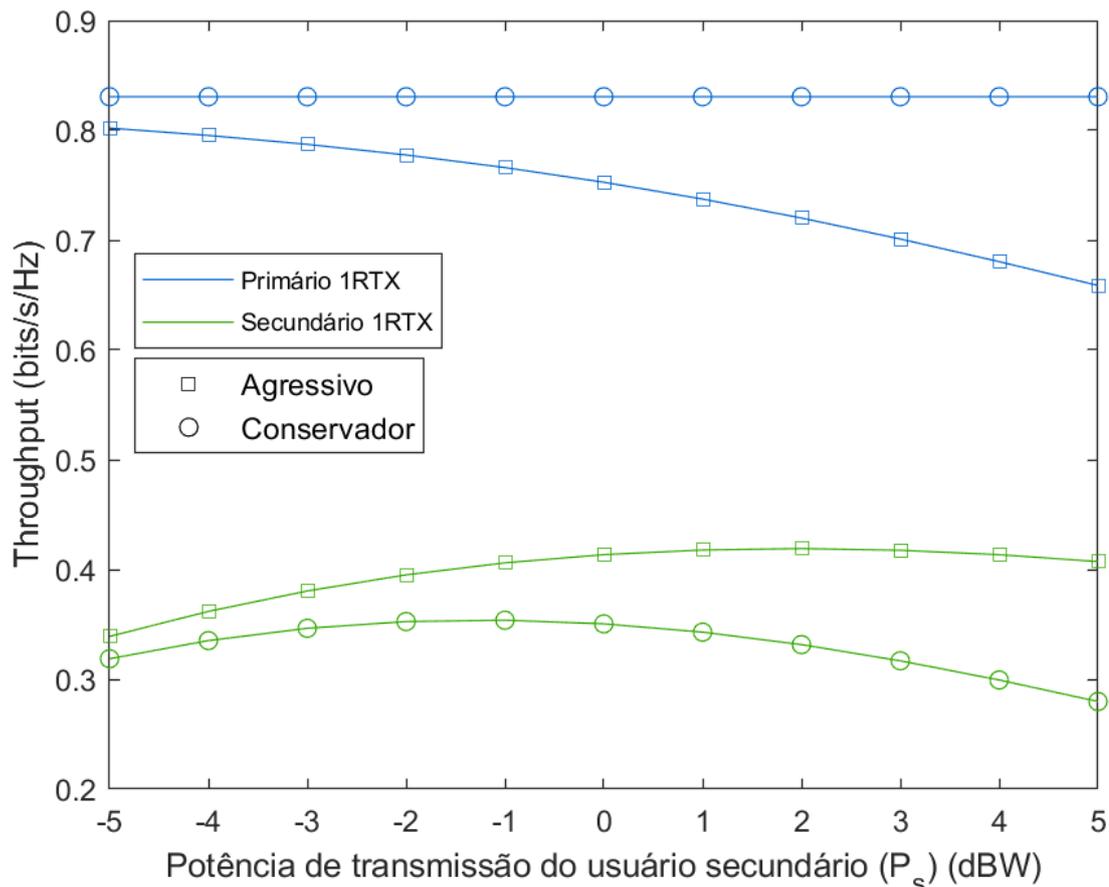


Figura 06 – Comparação de *throughput* vs. P_s

A Figura 07 refere-se à evolução do *throughput* efetivo de acordo com a relação sinal-interferência no receptor primário (SIR_{PR}), mantendo a mesma potência de transmissão para primário e secundário, ganho de canal direto constante e variando a interferência entre eles (λ_{21}). A eficiência espectral nominal primária (R_p) é igual a 1 e os ganhos de canal primário (λ_{11}) e secundário (λ_{22}) são iguais a 4 e 1 respectivamente. O ganho de enlace cruzado (λ_{21}) é calculado utilizando o *threshold* otimizado da Eq. (30).

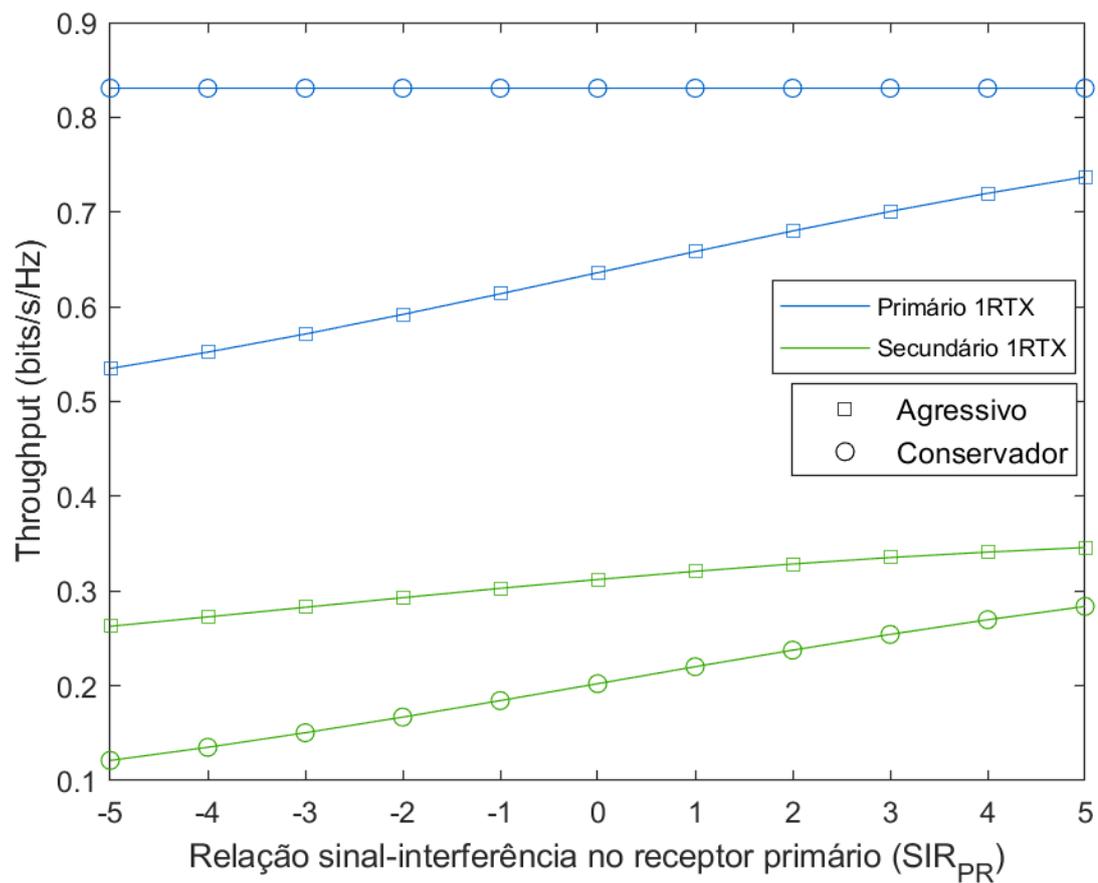


Figura 07 – Comparação de *throughput* vs. SIR_{PR}

3 SHARP COM DUAS RETRANSMISSÕES

Originalmente, o método SHARP foi idealizado somente com a possibilidade de uma retransmissão. Propõe-se neste capítulo estender o estudo para a possibilidade de duas retransmissões a fim de analisar os possíveis efeitos em termos de *throughput* para os usuários primário e secundário.

3.1 Modelo do sistema

O modelo do sistema utilizado segue exatamente como ilustrado anteriormente na Figura 01, no qual usuários primários e secundários compartilham o canal e possuem potências de transmissão e taxas já previamente definidas. As transmissões são caracterizadas pelos mesmos parâmetros de ganho e *threshold* definidos anteriormente.

Para encontrar as regiões de operação, considera-se uma transmissão bem-sucedida se, com o resultado de até três transmissões, atinge-se uma recepção com o *threshold* mínimo necessário. Conforme mencionado anteriormente, oportunidades de transmissão para o secundário dependem da relação entre o ganho do canal direto (g_{11}) e do canal cruzado (g_{21}). Os *thresholds* que indicam o sucesso de uma transmissão para o primário e secundário são respectivamente $\gamma_p \triangleq 2^{R_p} - 1$ e $\gamma_s \triangleq 2^{R_s} - 1$.

3.2 Regiões de operação

Da mesma forma que anteriormente, as regiões de operação são definidas utilizando a relação nível de sinal sobre o ruído e interferência (*SINR*) e a relação nível de sinal sobre o ruído (*SNR*) como parâmetros, em conjunto com o *threshold* primário (γ_p), para determinar o sucesso de uma transmissão. No receptor é utilizado o *maximum-ratio combining* (MRC) [16] e o sinal resultante possui SNR correspondente à soma da SNR de cada sinal recebido.

Com duas retransmissões possíveis, o número de regiões de operação aumenta para dez. As dez possíveis regiões de operação são definidas a seguir:

1. O canal primário suporta a taxa em uma transmissão apesar da interferência do secundário. É o melhor cenário possível. Sob esta condição, o secundário pode sempre transmitir.

$$\frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} > \gamma_p \quad (31)$$

2. O canal primário suporta a taxa em uma transmissão sem interferência, porém necessita de duas transmissões para ter sucesso na presença de interferência. Sob esta condição, o secundário pode sempre transmitir sem causar *outage* no primário, porém irá diminuir o *throughput* efetivo do usuário primário.

$$\frac{\gamma_p}{2} < \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} < \gamma_p \quad (32)$$

$$\frac{P_p g_{11}}{N} > \gamma_p \quad (33)$$

3. O canal primário suporta a taxa em uma transmissão sem interferência, porém necessita de três transmissões para ter sucesso na presença de interferência. Sob esta condição, o secundário pode sempre transmitir sem causar *outage* no primário, porém irá diminuir o *throughput* efetivo do usuário primário.

$$\frac{\gamma_p}{3} < \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} < \frac{\gamma_p}{2} \quad (34)$$

$$\frac{P_p g_{11}}{N} > \gamma_p \quad (35)$$

4. O canal primário suporta a taxa em uma transmissão sem interferência, porém mesmo com três transmissões não é possível obter sucesso na presença de interferência. Sob esta condição, o secundário pode transmitir duas vezes a cada três transmissões primárias sem causar *outage* no primário, porém irá diminuir o *throughput* efetivo do usuário primário.

$$\frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} < \frac{\gamma_p}{3} \quad (36)$$

$$\frac{P_p g_{11}}{N} > \gamma_p \quad (37)$$

5. O canal primário suporta a taxa em duas transmissões sem interferência. Também há sucesso em duas transmissões caso somente uma transmissão esteja sujeita à interferência. Sob esta condição, o secundário pode transmitir uma vez a cada duas transmissões primárias sem causar *outage* no primário. Não ocorre prejuízo ao *throughput* efetivo do usuário primário.

$$\frac{P_p g_{11}}{N} + \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} > \gamma_p \quad (38)$$

$$\frac{\gamma_p}{2} < \frac{P_p g_{11}}{N} < \gamma_p \quad (39)$$

6. O canal primário suporta a taxa em duas transmissões sem interferência. Também há sucesso em três transmissões caso somente duas transmissões estejam sujeitas à interferência. Sob esta condição, o secundário pode transmitir duas vezes a cada três transmissões sem causar *outage* no primário, porém irá diminuir o *throughput* efetivo do usuário primário.

$$\frac{P_p g_{11}}{N} + \frac{2P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} > \gamma_p \quad (40)$$

$$\frac{\gamma_p}{2} < \frac{P_p g_{11}}{N} < \gamma_p \quad (41)$$

7. O canal primário suporta a taxa em duas transmissões sem interferência. Também há sucesso em três transmissões caso somente uma transmissão esteja sujeita à interferência. Sob esta condição, o secundário pode transmitir uma vez a cada três transmissões sem causar *outage* no primário, porém irá diminuir o *throughput* efetivo do usuário primário.

$$\frac{P_p g_{11}}{N} + \frac{2P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} < \gamma_p \quad (42)$$

$$\frac{\gamma_p}{2} < \frac{P_p g_{11}}{N} < \gamma_p \quad (43)$$

8. O canal primário suporta a taxa em três transmissões sem interferência. Também há sucesso em três transmissões caso somente uma transmissão esteja sujeita à interferência. Sob esta condição, o secundário pode transmitir uma vez

a cada três transmissões sem causar *outage* no primário. Não ocorre prejuízo ao *throughput* efetivo do usuário primário.

$$\frac{2P_p g_{11}}{N} + \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} > \gamma_p \quad (44)$$

$$\frac{\gamma_p}{3} < \frac{P_p g_{11}}{N} < \frac{\gamma_p}{2} \quad (45)$$

9. O canal primário suporta a taxa em três transmissões sem interferência. Não há sucesso caso haja qualquer interferência. Sob esta condição, o secundário deve permanecer em silêncio.

$$\frac{2P_p g_{11}}{N} + \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + N} < \gamma_p \quad (46)$$

$$\frac{\gamma_p}{3} < \frac{P_p g_{11}}{N} < \frac{\gamma_p}{2} \quad (47)$$

10. O ganho no canal primário é tão pequeno que ocorre *outage* mesmo com três transmissões sem interferência. Sob esta condição, o secundário pode transmitir sempre sem se preocupar com o usuário primário.

$$\frac{P_p g_{11}}{N} < \frac{\gamma_p}{3} \quad (48)$$

O plano g_{11} - g_{21} ilustrado na Figura 08 mostra as diferentes janelas de transmissão para o secundário de acordo com o ganho do canal primário (g_{11}) e o nível de interferência do secundário no receptor primário (g_{21}). As equações das funções presentes no gráfico da Figura 08 que delimitam as regiões são derivadas das próprias definições de cada região de operação apresentadas anteriormente.

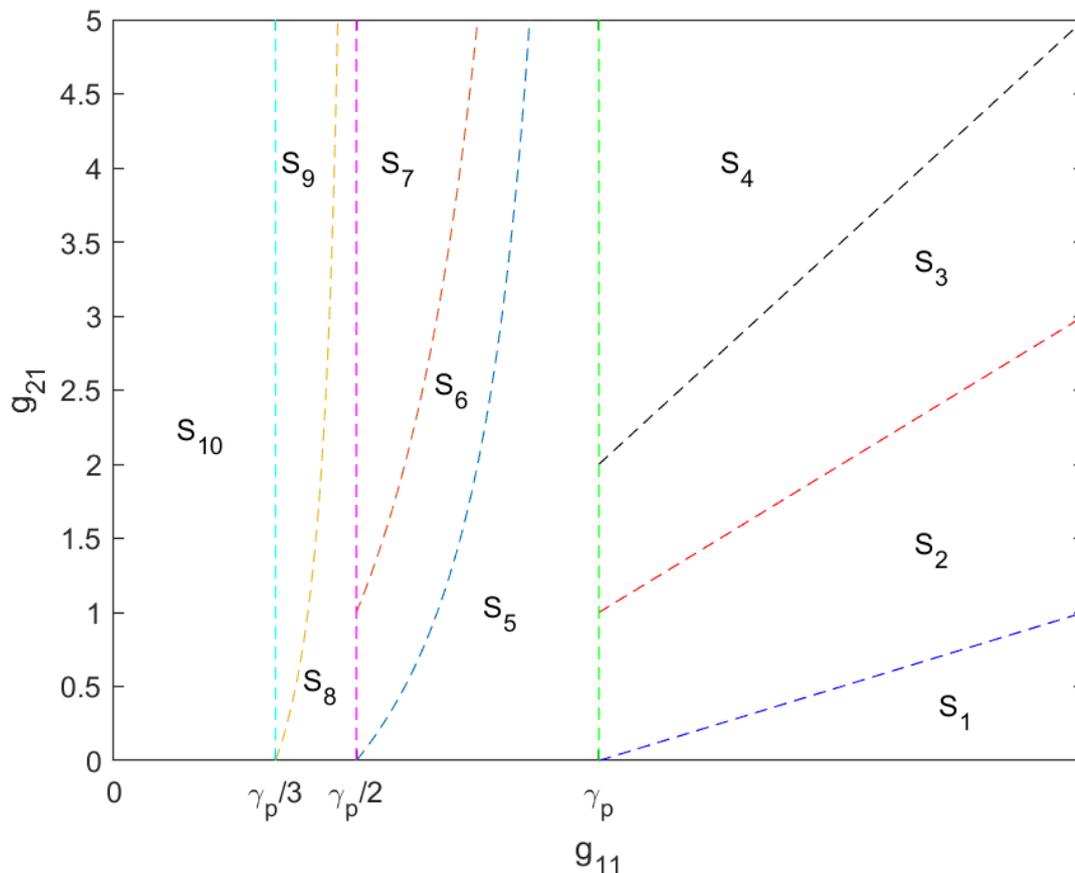


Figura 08 – Plano g_{11} - g_{21} para o SHARP com duas retransmissões

3.3 Modos de operação

Os modos de operação agressivo e conservador seguem o mesmo padrão de anteriormente, definindo como o usuário secundário deve transmitir de acordo com a região de operação.

3.4 Fluxograma

O algoritmo de detecção da região de operação segue também um fluxograma e utiliza o mesmo procedimento apresentado no capítulo anterior.

O mecanismo é sistematicamente implementado. Iniciando-se na raiz da árvore, o secundário permanece em silêncio durante a primeira transmissão e observa o ACK/NACK do usuário primário, para a partir desta informação, decidir o caminho a seguir. A cada transmissão é construído um galho da árvore até chegar-se à folha.

Quando uma região é encontrada, um *loop* de transmissão é iniciado e perpetua-se até que as condições do canal mudem. Ocasionalmente, devido ao desvanecimento do canal, o secundário deverá observar novamente o canal e reiniciar o processo.

Os fluxogramas para os modos agressivo e conservador são apresentados nas Figuras 09 e 10, respectivamente:

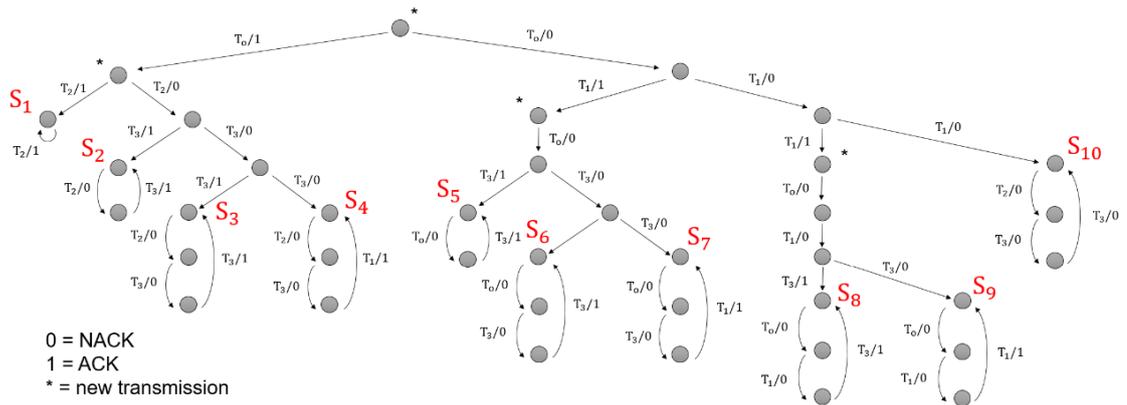


Figura 09 – Fluxograma para o SHARP agressivo com duas retransmissões

Para o modo conservador, as regiões S_2 , S_3 e S_4 do modo agressivo foram unidas em uma mesma região de operação S_2' pois a transmissão secundária apresenta degradação no *throughput* efetivo do usuário primário. O mesmo ocorre para S_6 e S_7 que se juntaram em S_6' . Nestas regiões, não é permitida transmissão secundária.

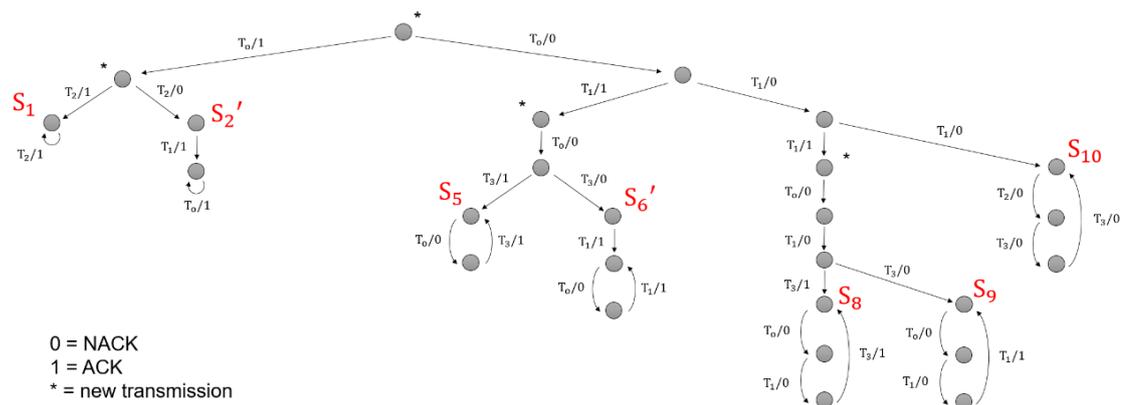


Figura 10 – Fluxograma para o SHARP conservador com duas retransmissões

3.5 Análise do *throughput*

Resultados analíticos são apresentados nesta seção para os modos agressivo e conservador do SHARP. As probabilidades das dez regiões de operação são calculadas com base nos limites de *threshold*. A probabilidade de *outage* para os usuários primário e secundário também é mostrada. Finalmente, os *throughputs* de ambos os usuários são encontrados.

3.5.1 Probabilidades das regiões de operação

Por simplicidade, as mesmas premissas do capítulo anterior são utilizadas:

11. O ruído de fundo N é igual a 1;
12. O ganho do canal é composto pelo valor médio λ_{ij} e a variável aleatória x_{ij} , ou seja, $g_{11} \triangleq \lambda_{11}x_{11}$ e $g_{21} \triangleq \lambda_{21}x_{21}$, em que x_{11}, x_{21} seguem uma distribuição exponencial de média unitária.

Primeiramente, a probabilidade de S_1 pode ser encontrada por:

$$\begin{aligned}
 P\{S_1\} &= P\left\{\frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} \geq \gamma_p\right\} = P\left\{x_{11} \geq \frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}\right\} \\
 &= 1 - F\left(\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}\right) = e^{-\gamma_p \frac{(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}} \\
 &= \int_0^\infty \left[e^{-\gamma_p \frac{(1 + P_s \lambda_{21} y)}{\lambda_{11} P_p}} e^{-y} \right] dy
 \end{aligned} \tag{49}$$

A probabilidade da região combinada $S_2' = S_2 \cup S_3 \cup S_4$ é:

$$\begin{aligned}
P\{S_2'\} &= P\left\{P_p g_{11} \geq \gamma_p, \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} < \gamma_p\right\} \\
&= P\left\{\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p} \leq x_{11} \leq \frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}\right\} \\
&= F\left(\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}\right) - F\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}\right) \\
&= e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{\lambda_{11} P_p}} \\
&= \int_0^\infty \left[e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}} - e^{-\gamma_p \left(\frac{1 + P_s \lambda_{21} y}{\lambda_{11} P_p}\right)} \right] e^{-y} dy
\end{aligned} \tag{50}$$

Define-se a região $S_3' = S_3 \cup S_4$ para auxiliar no cálculo das probabilidades.

A probabilidade conjunta é:

$$\begin{aligned}
P\{S_3'\} &= P\left\{P_p g_{11} \geq \gamma_p, \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} < \frac{\gamma_p}{2}\right\} \\
&= P\left\{\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p} \leq x_{11} \leq \frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{2\lambda_{11} P_p}\right\} \\
&= F\left(\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{2\lambda_{11} P_p}\right) - F\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}\right) \\
&= e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{2\lambda_{11} P_p}} \\
&= \int_{\frac{1}{P_s \lambda_{21}}}^\infty \left[e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{2} \left(\frac{1 + P_s \lambda_{21} y}{\lambda_{11} P_p}\right)} \right] e^{-y} dy
\end{aligned} \tag{51}$$

em que o limite inferior da integral é definido de forma a satisfazer a desigualdade:

$$\begin{aligned}
\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p} \leq x_{11} \leq \frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{2\lambda_{11} P_p} &\leftrightarrow 2 \leq 1 + P_s \lambda_{21} x_{21} \\
x_{21} &\geq \frac{1}{P_s \lambda_{21}}
\end{aligned} \tag{52}$$

A probabilidade de S_4 é:

$$\begin{aligned}
P\{S_4\} &= P\left\{\frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} < \frac{\gamma_p}{3}, P_p g_{11} > \gamma_p\right\} \\
&= P\left\{\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p} \leq x_{11} \leq \frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{3\lambda_{11} P_p}\right\} \\
&= e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{3\lambda_{11} P_p}} \\
&= \int_{\frac{2}{P_s \lambda_{21}}}^{\infty} \left[e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} y)}{3\lambda_{11} P_p}} \right] e^{-y} dy
\end{aligned} \tag{53}$$

em que o limite inferior da integral é definido de forma a satisfazer a desigualdade:

$$\begin{aligned}
\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p} \leq x_{11} \leq \frac{\gamma_p(1 + P_s \lambda_{21} x_{21})}{3\lambda_{11} P_p} &\leftrightarrow 3 \leq 1 + P_s \lambda_{21} x_{21} \\
x_{21} &\geq \frac{2}{P_s \lambda_{21}}
\end{aligned} \tag{54}$$

Assim, encontra-se as probabilidades de S_2 e S_3 :

$$P\{S_3\} = P\{S'_3\} - P\{S_4\} \tag{55}$$

$$P\{S_2\} = P\{S'_2\} - P\{S'_3\} \tag{56}$$

Também é definida a região $S'_5 = S_5 \cup S_6 \cup S_7$ para auxiliar no cálculo das probabilidades. A probabilidade conjunta é:

$$\begin{aligned}
P\{S'_5\} &= P\left\{\frac{\gamma_p}{2} < P_p g_{11} < \gamma_p\right\} = P\left\{\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11} P_p} \leq x_{11} \leq \frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}\right\} \\
&= F\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}\right) - F\left(\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11} P_p}\right) = e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11} P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11} P_p}}
\end{aligned} \tag{57}$$

A probabilidade de $S'_6 = S_6 \cup S_7$ é:

$$\begin{aligned}
P\{S'_6\} &= P\left\{P_p g_{11} + \frac{2P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} < \gamma_p + \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1}, \frac{\gamma_p}{2} < P_p g_{11} < \gamma_p\right\} \\
&= P\left\{\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p} < x_{11} < \frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 2}\right)\right\} \\
&= F\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 2}\right)\right) - F\left(\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}\right) \\
&= e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 2}\right)} \\
&= \int_0^\infty \left[e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} y + 1}{P_s \lambda_{21} y + 2}\right)} \right] e^{-y} dy
\end{aligned} \tag{58}$$

em que o limite inferior da integral é definido de forma a satisfazer a desigualdade:

$$\begin{aligned}
\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p} < x_{11} < \frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 2}\right) &\leftrightarrow \frac{1}{2} < \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 2}\right) \\
2(P_s \lambda_{21} x_{21} + 1) > (P_s \lambda_{21} x_{21} + 2) &\leftrightarrow P_s \lambda_{21} x_{21} > 0 \leftrightarrow x_{21} \geq 0
\end{aligned} \tag{59}$$

Encontra-se, portanto, a probabilidade da região S_5 :

$$P\{S_5\} = P\{S'_5\} - P\{S'_6\} \tag{60}$$

A probabilidade de S_7 é:

$$\begin{aligned}
P\{S_7\} &= P\left\{P_p g_{11} + \frac{2P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} < \gamma_p, \frac{\gamma_p}{2} < P_p g_{11} < \gamma_p\right\} \\
&= P\left\{\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p} < x_{11} < \frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 3}\right)\right\} \\
&= F\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 3}\right)\right) - F\left(\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}\right) \\
&= e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} x_{21} + 1}{P_s \lambda_{21} x_{21} + 3}\right)} \\
&= \int_{\frac{1}{P_s \lambda_{21}}}^\infty \left[e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s \lambda_{21} y + 1}{P_s \lambda_{21} y + 3}\right)} \right] e^{-y} dy
\end{aligned} \tag{61}$$

em que o limite inferior da integral é definido de forma a satisfazer a desigualdade:

$$\begin{aligned} \frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p} < x_{11} < \frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s\lambda_{21}x_{21} + 1}{P_s\lambda_{21}x_{21} + 3} \right) &\leftrightarrow \frac{1}{2} < \left(\frac{P_s\lambda_{21}x_{21} + 1}{P_s\lambda_{21}x_{21} + 3} \right) \\ 2(P_s\lambda_{21}x_{21} + 1) > (P_s\lambda_{21}x_{21} + 3) &\leftrightarrow P_s\lambda_{21}x_{21} > 1 \leftrightarrow x_{21} \geq \frac{1}{P_s\lambda_{21}} \end{aligned} \quad (62)$$

Portanto, a probabilidade da região S_6 é:

$$P\{S_6\} = P\{S'_6\} - P\{S_7\} \quad (63)$$

Assim como anteriormente, é definida a região $S_8' = S_8 \cup S_9$ para auxiliar no cálculo das probabilidades. A probabilidade conjunta é:

$$\begin{aligned} P\{S_8'\} &= P\left\{ \frac{\gamma_p}{3} < g_{11}P_p < \frac{\gamma_p}{2} \right\} = P\left\{ \frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p} < x_{11} < \frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p} \right\} \\ &= F\left(\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p} \right) - F\left(\frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p} \right) = e^{-\frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{2\lambda_{11}P_p}} \end{aligned} \quad (64)$$

A probabilidade de S_9 é:

$$\begin{aligned} P\{S_9\} &= P\left\{ 2P_p g_{11} + \frac{P_p g_{11}}{P_s g_{21} + 1} < \gamma_p, \frac{\gamma_p}{3} < P_p g_{11} < \frac{\gamma_p}{2} \right\} \\ &= P\left\{ \frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p} < x_{11} < \frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s\lambda_{21}x_{21} + 1}{2P_s\lambda_{21}x_{21} + 3} \right) \right\} \\ &= F\left(\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s\lambda_{21}x_{21} + 1}{2P_s\lambda_{21}x_{21} + 3} \right) \right) - F\left(\frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p} \right) \\ &= e^{-\frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s\lambda_{21}x_{21} + 1}{2P_s\lambda_{21}x_{21} + 3} \right)} \\ &= \int_0^\infty \left[e^{-\frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p}} - e^{-\frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s\lambda_{21}y + 1}{2P_s\lambda_{21}y + 3} \right)} \right] e^{-y} dy \end{aligned} \quad (65)$$

em que o limite inferior da integral é definido de forma a satisfazer a desigualdade:

$$\begin{aligned} \frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p} < x_{11} < \frac{\gamma_p}{\lambda_{11}P_p} \left(\frac{P_s\lambda_{21}x_{21} + 1}{2P_s\lambda_{21}x_{21} + 3} \right) &\leftrightarrow \frac{1}{3} < \left(\frac{P_s\lambda_{21}x_{21} + 1}{2P_s\lambda_{21}x_{21} + 3} \right) \\ 3(P_s\lambda_{21}x_{21} + 1) > (2P_s\lambda_{21}x_{21} + 3) &\leftrightarrow P_s\lambda_{21}x_{21} > 0 \leftrightarrow x_{21} \geq 0 \end{aligned} \quad (66)$$

Com o mesmo raciocínio anterior, encontra-se as probabilidades de S_8 e S_{10} :

$$P\{S_8\} = P\{S'_8\} - P\{S_9\} \quad (67)$$

$$\begin{aligned} P\{S_{10}\} &= P\left\{g_{11}P_p < \frac{\gamma_p}{3}\right\} = P\left\{x_{11} < \frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p}\right\} \\ &= F\left(\frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p}\right) = 1 - e^{-\frac{\gamma_p}{3\lambda_{11}P_p}} \end{aligned} \quad (68)$$

As probabilidades encontradas podem ser validadas com alguns casos numéricos conforme a Tabela 01. Em todos os casos, a soma das probabilidades é igual à unidade, comprovando as regiões de operação.

Tabela 01 – Validação do cálculo de probabilidades das regiões de operação

CENÁRIO 01		CENÁRIO 02		CENÁRIO 03		CENÁRIO 04	
PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR
λ_{11}	4	λ_{11}	2	λ_{11}	3	λ_{11}	1
λ_{21}	1	λ_{21}	2	λ_{21}	1	λ_{21}	4
λ_{22}	4	λ_{22}	1	λ_{22}	2	λ_{22}	3
R_p	1	R_p	2	R_p	1	R_p	2
R_s	0.5	R_s	1	R_s	2	R_s	2
P_p	1	P_p	2	P_p	1	P_p	2
P_s	1	P_s	1	P_s	2	P_s	2
B	1	B	1	B	1	B	1
N	1	N	1	N	1	N	1
PROBABILIDADE	VALOR	PROBABILIDADE	VALOR	PROBABILIDADE	VALOR	PROBABILIDADE	VALOR
S_1	0.6230	S_1	0.1889	S_1	0.4299	S_1	0.0172
S_2	0.1239	S_2	0.1606	S_2	0.1780	S_2	0.0372
S_3	0.0237	S_3	0.0649	S_3	0.0607	S_3	0.0298
S_4	0.0081	S_4	0.0579	S_4	0.0479	S_4	0.1390
S_5	0.0738	S_5	0.1204	S_5	0.0754	S_5	0.0684
S_6	0.0229	S_6	0.0542	S_6	0.0316	S_6	0.0469
S_7	0.0070	S_7	0.0403	S_7	0.0230	S_7	0.1340
S_8	0.0251	S_8	0.0483	S_8	0.0259	S_8	0.0361
S_9	0.0124	S_9	0.0432	S_9	0.0225	S_9	0.0980
S_{10}	0.0800	S_{10}	0.2212	S_{10}	0.1052	S_{10}	0.3935

3.5.2 Probabilidade de *outage*

Através das equações anteriores pode-se perceber que não existe *outage* primário nas regiões $S_1 - S_9$, enquanto que em S_{10} as transmissões primárias não obtêm sucesso em nenhum momento. Assim sendo, a probabilidade de *outage* para o usuário primário nos modos conservador e agressivo é igual a $P\{S_{10}\}$.

Para o usuário secundário, considera-se que a interferência do usuário primário é perfeitamente cancelada no receptor secundário. Este resultado é baseado na premissa de que o receptor secundário está localizado muito distante do transmissor primário (*nível de interferência* = $g_{12}P_p \approx 0$) ou muito próximo, de forma que consiga identificar e cancelar a interferência. Assim sendo, leva-se em consideração somente a *SNR* do sinal presente no receptor secundário. A probabilidade de *outage* corresponde a uma *SNR* inferior a γ_s , dada por:

$$\begin{aligned} P^{OS} &= P\left\{\frac{P_s g_{22}}{N} < \gamma_s\right\} = P\left\{x_{22} < \frac{\gamma_s}{P_s \lambda_{22}}\right\} \\ &= F\left(\frac{\gamma_s}{P_s \lambda_{22}}\right) = 1 - e^{-\frac{\gamma_s}{\lambda_{22} P_s}} \end{aligned} \quad (69)$$

3.5.3 *Throughput* efetivo

Como anteriormente, o *throughput* efetivo para os modos agressivo e conservador são dependentes da região na qual os usuários primário e secundário estão operando devido às diferentes oportunidades de transmissão possíveis em cada caso. O *throughput* é calculado utilizando-se as probabilidades de ocorrência de cada região, bem como o *throughput* em cada região. Por exemplo, se em determinada região de operação o usuário primário consegue transmitir o pacote com sucesso em uma, duas ou três transmissões, tem-se um *throughput* efetivo de R_p , $\frac{R_p}{2}$ e $\frac{R_p}{3}$, respectivamente.

Para o SHARP agressivo, os *throughputs* efetivos primário e secundário são:

$$G_p^A = \left[\begin{array}{c} R_p P\{S_1\} + \frac{R_p}{2} (P\{S_2\} + P\{S_5\}) \\ + \frac{R_p}{3} (P\{S_3\} + P\{S_4\} + P\{S_6\} + P\{S_7\} + P\{S_8\} + P\{S_9\}) \end{array} \right] \quad (70)$$

$$G_s^A = \left[\begin{array}{c} R_s (P\{S_1\} + P\{S_2\} + P\{S_3\} + P\{S_{10}\}) \\ + \frac{2R_s}{3} (P\{S_4\} + P\{S_6\}) \\ + \frac{R_s}{2} (P\{S_5\}) + \frac{R_s}{3} (P\{S_7\} + P\{S_8\}) \end{array} \right] (1 - P^{OS}) \quad (71)$$

Para o SHARP conservador:

$$G_p^C = \left[\begin{array}{c} R_p(P\{S_1\} + P\{S_2'\}) \\ + \frac{R_p}{2}(P\{S_5\} + P\{S_6'\}) + \frac{R_p}{3}(P\{S_8\} + P\{S_9\}) \end{array} \right] \quad (72)$$

$$G_s^C = [R_s(P\{S_1\} + P\{S_{10}\}) + \frac{R_s}{2}(P\{S_5\}) + \frac{R_s}{3}(P\{S_8\})](1 - P^{OS}) \quad (73)$$

Ao considerar três transmissões possíveis, um maior número de termos aparece na análise do *throughput* efetivo se comparado com o caso anterior, justamente por surgirem novas oportunidades para o envio de dados.

3.6 Resultados numéricos

Nesta seção apresentam-se resultados numéricos para a extensão do SHARP proposta. Todos os canais (primário, secundário e enlace cruzado) seguem uma distribuição *Rayleigh*. Caso não seja mencionado, a potência de transmissão primária e secundária, assim como a variância do ruído Gaussiano N , são, por definição, iguais à unidade.

O primeiro resultado, ilustrado na Figura 11, mostra como a probabilidade em cada região de operação muda de acordo com a potência de transmissão do usuário secundário (P_s). Pode-se observar regiões de operação cujas probabilidades são diretamente proporcionais à potência de transmissão secundária por serem dependentes da interferência causada como, por exemplo, S_2, S_3, S_4, S_7 e S_9 . Outras regiões de operação possuem probabilidades inversamente proporcionais e são afetadas com o aumento da interferência, como S_1, S_5 e S_8 . A região de operação S_{10} tem probabilidade independente da potência do usuário secundário.

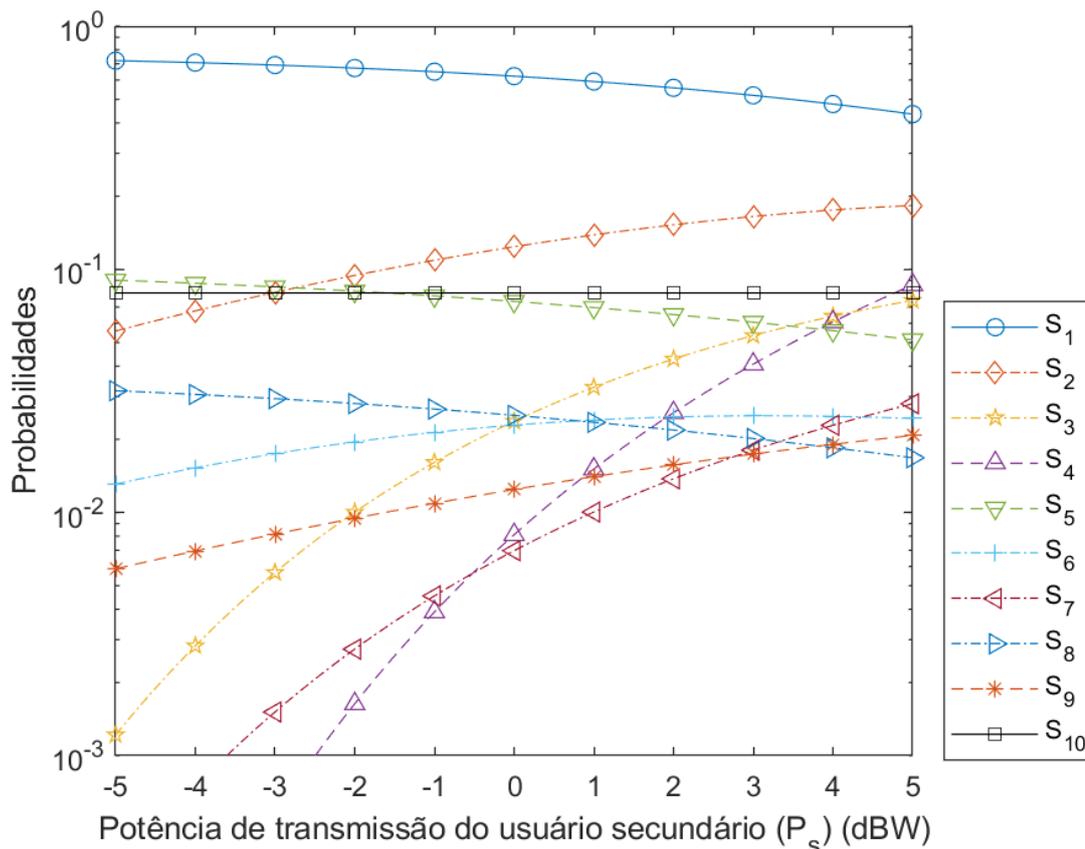


Figura 11 – Probabilidade das regiões de operação vs. Potência de transmissão do usuário secundário (P_s)

A Figura 12 contém o *throughput* efetivo para o SHARP agressivo e conservador nos casos de duas e três transmissões, variando-se a potência de transmissão secundária. As eficiências espectrais nominais primária (R_p) e secundária (R_s) são iguais a 1 e 0.5, respectivamente. Os ganhos de canal primário (λ_{11}) e secundário (λ_{22}) são iguais a 4 e o enlace cruzado (λ_{21}) tem ganho igual a 1.

Nota-se que as curvas não mudam significativamente ao adicionar mais uma retransmissão ao sistema. No entanto, o usuário primário experimentou um ganho em desempenho no modo conservador, contrário ao secundário. Por outro lado, no modo agressivo, o usuário primário é beneficiado em situações com menor interferência para mais retransmissões, enquanto que para o usuário secundário, ocorre o contrário. Estes resultados mostram que o sistema pode possuir um comportamento generalizado independentemente do número de retransmissões, visto que as curvas pouco mudaram de formato.

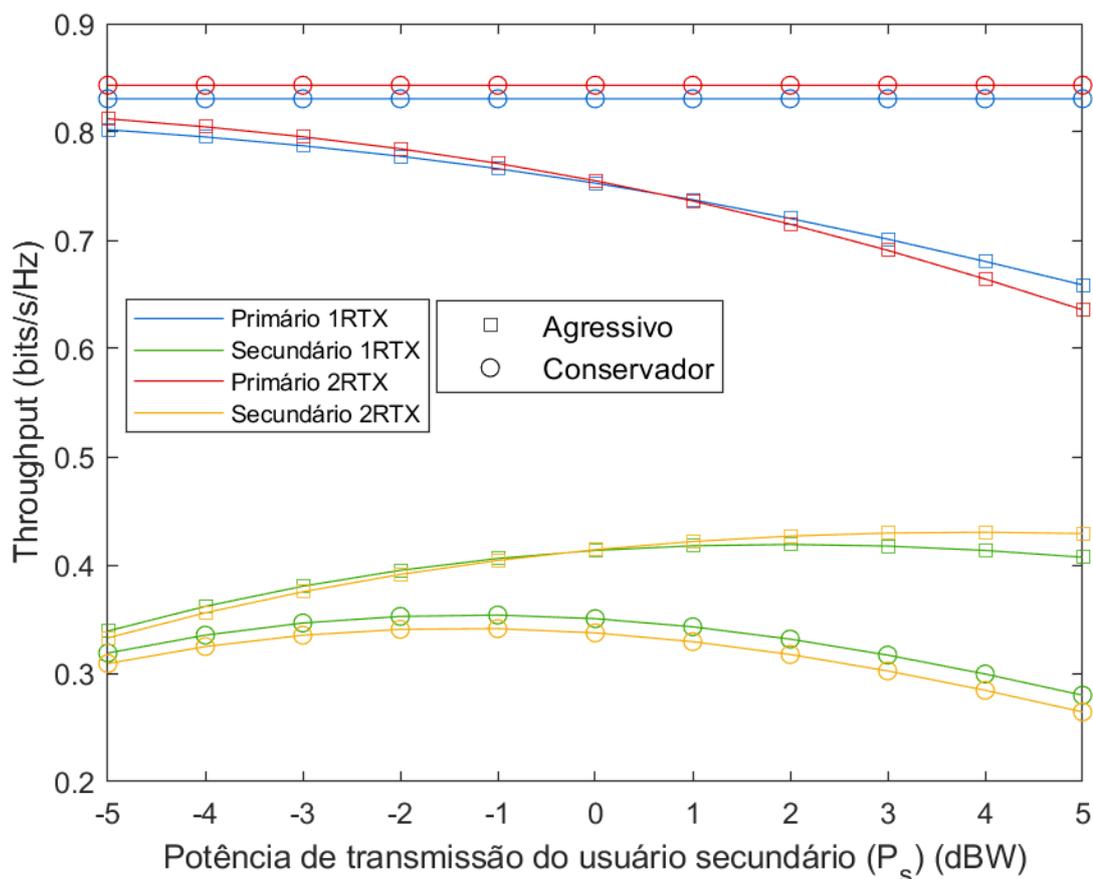


Figura 12 – Comparação de *throughput* vs. Potência de transmissão do usuário secundário (P_s)

A Figura 13 refere-se à evolução do *throughput* efetivo de acordo com a relação sinal-interferência no receptor primário (SIR_{PR}), mantendo a mesma potência de transmissão para primário e secundário, ganho de canal direto constante e variando a interferência entre eles (λ_{21}). A eficiência espectral nominal primária (R_p) é igual a 1 e os ganhos de canal primário (λ_{11}) e secundário (λ_{22}) são iguais a 4 e 1 respectivamente. O ganho de enlace cruzado (λ_{21}) é calculado utilizando o *threshold* otimizado da Eq. (30).

Comparando-se o número de retransmissões, nota-se novamente que as curvas não alteram seu formato de forma significativa. O usuário primário obtém um melhor desempenho para o modo conservador, enquanto que o contrário ocorre para o modo agressivo. O usuário secundário é beneficiado com mais retransmissões para o modo agressivo, mas tem desempenho inferior no modo conservador. Ambos os casos

podem ser explicados devido à interferência do usuário secundário causada no usuário primário pelo maior número de transmissões agora permitido. De forma geral, quanto maior a relação sinal-interferência do sinal recebido no receptor primário (SIR_{PR}), melhor o *throughput* do sistema.

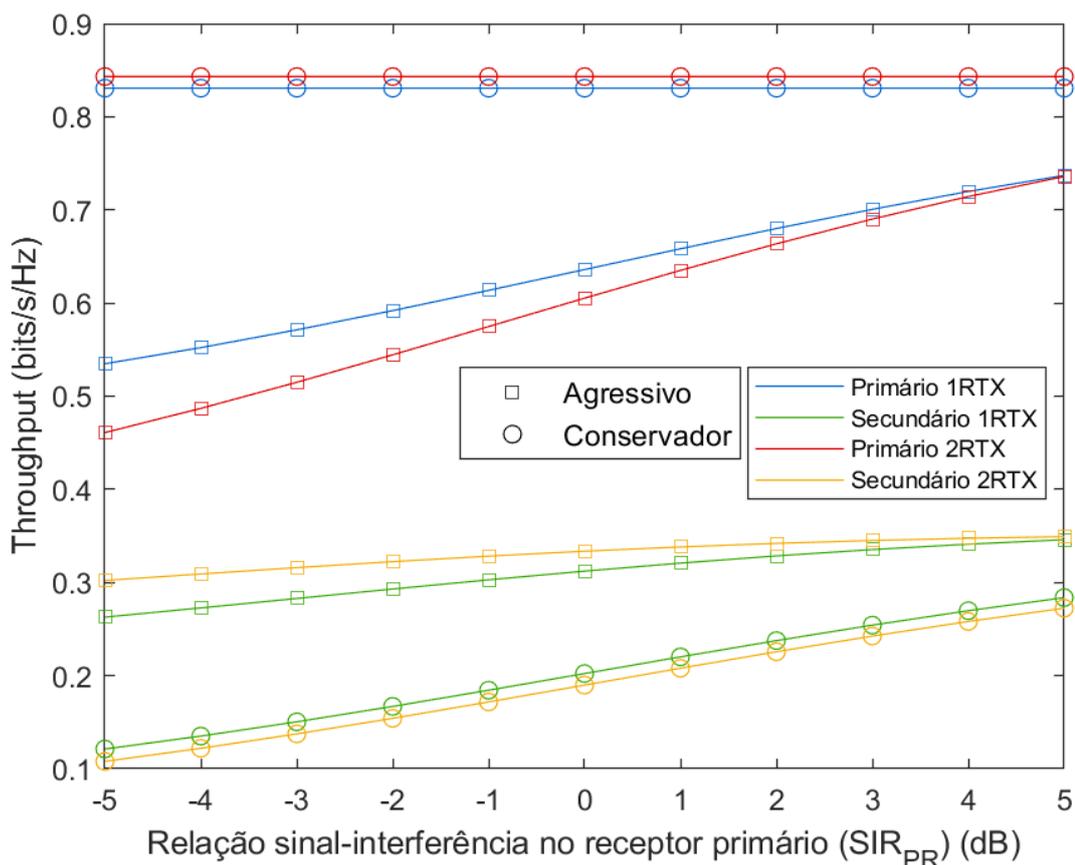


Figura 13 – Comparação de *throughput* vs. Relação sinal-interferência no receptor primário (SIR_{PR})

3.7 Conclusão

Neste capítulo foi analisado o efeito na operação do SHARP para duas retransmissões com os possíveis efeitos em termos de *throughput* para os usuários primário e secundário. A mesma abordagem utilizada em [15] foi empregada para encontrar todas as regiões de operação e suas respectivas probabilidades, assim como o algoritmo de descoberta e a representação por fluxograma.

De forma geral, comparando-se todos os resultados, nota-se que um maior número de retransmissões não altera de forma significativa o formato das curvas nos gráficos, indicando uma possível generalização do comportamento. Além disso, o número de regiões de operação cresce significativamente com o aumento do número de retransmissões possíveis como ilustrado nos fluxogramas apresentados.

Resultados numéricos mostram que, para o SHARP agressivo, aumentar o número de retransmissões em situações com menor interferência secundária resulta em um maior *throughput* primário, situação que se altera à medida que a interferência aumenta. O contrário ocorre para o usuário secundário, o qual se beneficia com mais retransmissões para o modo agressivo. Com relação ao SHARP conservador, mais retransmissões possíveis significa, de forma geral, uma melhora no *throughput* efetivo primário em detrimento do *throughput* secundário.

Ao considerar-se um cenário genérico com n retransmissões possíveis, tudo indica que as curvas tendem a apresentar o mesmo formato sem mudanças significativas, porém com um leve ganho de desempenho, seguindo o mesmo comportamento dos resultados obtidos nesta seção. O *tradeoff* entre o ganho no desempenho e a latência ocasionada por mais retransmissões deve ser levado em consideração. A próxima seção considera um novo estudo ao analisar o efeito do atraso nas transmissões do modelo SHARP.

4 ANÁLISE DO ATRASO NO MODELO SHARP

Propõe-se neste capítulo acrescentar ao método SHARP original [15] uma nova variável de estudo: o atraso. Analisa-se o impacto nas transmissões em diferentes cenários, variando-se a interferência causada pelo usuário secundário, o tamanho dos pacotes de dados, a utilização do canal, a eficiência espectral do usuário primário e a potência de transmissão primária. Considera-se, neste primeiro momento, apenas uma retransmissão disponível para o usuário primário.

4.1 Modelo do sistema

O modelo do sistema utilizado mantém-se inalterado em relação ao ilustrado anteriormente na Figura 01, em que usuários primários e secundários compartilham do mesmo canal e possuem potências de transmissão e taxas já previamente definidas. As transmissões são caracterizadas pelos mesmos parâmetros de ganho e *threshold*.

4.2 Análise do atraso

Nesta subseção será calculado o atraso para transmitir um pacote com sucesso nas redes primária e secundária. Considera-se que o canal permaneça em desvanecimento lento durante um tempo suficiente para que o período transiente (identificação da região) possa ser desconsiderado. O atraso médio é calculado utilizando as probabilidades de ocorrência das regiões de operação.

Observando a operação do sistema, muitas variáveis precisam ser consideradas no estudo do atraso como o tempo de transmissão do pacote de dados, o tempo de transmissão do pacote de ACK, o tempo de retransmissão e o tempo de espera do pacote na fila. Cada uma destas variáveis será explicada a seguir:

4.5.1 Tempo de transmissão do pacote de dados

O tempo de transmissão do pacote de dados (T_{TX_i}) é definido como o tamanho do pacote dividido pela taxa de transmissão:

$$T_{TX_i} = \frac{l_i}{BR_{p;s}} \quad (74)$$

em que l_i é o tamanho do pacote de dados do usuário i , B é a banda de transmissão e $R_{p;s}$ é a eficiência espectral nominal primária ou secundária.

4.5.2 Tempo de transmissão do pacote ACK

O tempo de transmissão do pacote de ACK (T_{ACK_i}), de forma similar, é definido como o tamanho do pacote de ACK dividido pela taxa efetiva de transmissão:

$$T_{ACK_i} = \frac{l_{ACK_i}}{BR_p} \quad (75)$$

em que l_{ACK_i} é o tamanho do pacote de ACK do usuário i , B é a banda de transmissão e $R_{p;s}$ é a eficiência espectral nominal primária ou secundária.

4.5.3 Tempo de retransmissão

No caso de ocorrer uma transmissão sem sucesso, é necessária uma retransmissão. Adiciona-se o tempo correspondente a uma nova transmissão:

$$T_{RTX_i} = T_{TX_i} + T_{ACK_i} \quad (76)$$

4.5.4 Tempo de fila

Para o cálculo do tempo de espera do pacote na fila, considera-se que as estações possuem um *buffer* interno e geram pacotes conforme uma distribuição de *Poisson* com taxa de λ_i pacotes/segundo. O sistema de filas segue um modelo de fila M/G/1 conforme apresentado por SHORTLE et al. [17].

O tempo de fila ($T_{W_{iA;C}}$) é:

$$\left(T_{W_{iA;C}}\right) = \frac{\lambda_i E[X_i^2]_{A;C}}{2(1 - \rho_i)} \quad (77)$$

em que ρ_i é a utilização do canal, X_i é uma variável aleatória que representa o tempo necessário para a correta transmissão do pacote e $E[X_i^2]$ é seu respectivo segundo momento. Os índices i, A, C indicam o usuário primário ($i = 1$) ou secundário ($i = 2$) e os modos agressivo e conservador, respectivamente.

4.5.5 Tempo médio de serviço - $E[X_i]_{A;C}$

O primeiro momento da variável aleatória X_i ($E[X_i]_{A;C}$) representa o tempo médio de transmissão bem sucedida de um pacote (incluindo o tempo de transmissão do pacote ACK e o tempo de retransmissão caso necessário). Este valor varia de acordo com a região de operação (condições do canal) e será detalhado nas Seções 4.6.1 e 4.7.1 para os usuários primários e secundários, respectivamente.

4.5.6 Atraso total do pacote no sistema

O atraso total do pacote no sistema para o usuário i no modo agressivo ou conservador é definido como sendo o atraso médio de transmissão de um pacote no sistema somado ao tempo médio do pacote aguardando atendimento na fila.

$$T_{Q_{iA;C}} = E[X_i]_{S_{jA;C}} + T_{W_{iS_{jA;C}}} \quad (78)$$

4.6 Usuário primário

Para o cálculo do atraso total do usuário primário, determina-se primeiramente o tempo médio de serviço e em seguida o tempo de fila.

4.6.1 Tempo médio de serviço primário para cada região de operação

O tempo médio de serviço ($E[X_1]_{S_{jA;C}}$) é o tempo efetivo para a transmissão correta dos pacotes em cada região de operação, com exceção da região S_6 – situação em que o usuário primário transmite e retransmite sem sucesso cada pacote enviado pois encontra-se em *outage*. No regime permanente, o sistema permanece com *throughput* fixo até que as condições de canal mudem para outra região de operação.

Define-se uma constante $\alpha_{S_{jA;C}}$ para representar o número de transmissões necessárias de cada pacote transmitido corretamente em determinada região de

operação. Esta constante é obtida observando-se o fluxograma de operação apresentado na Seção 2.4. Abaixo relaciona-se o valor da constante para cada região de operação nos modos agressivo e conservador:

Agressivo:

$$S_1 \rightarrow \alpha_{S_1A} = 1 \quad (79)$$

$$S_2 \rightarrow \alpha_{S_2A} = 2 \quad (80)$$

$$S_3 \rightarrow \alpha_{S_3A} = 2 \quad (81)$$

$$S_4 \rightarrow \alpha_{S_4A} = 2 \quad (82)$$

$$S_5 \rightarrow \alpha_{S_5A} = 2 \quad (83)$$

$$S_6 \rightarrow \alpha_{S_6A} = N/A \quad (84)$$

Conservador:

$$S_1 \rightarrow \alpha_{S_1C} = 1 \quad (85)$$

$$S_2' \rightarrow \alpha_{S_2'C} = 1 \quad (86)$$

$$S_4 \rightarrow \alpha_{S_4C} = 2 \quad (87)$$

$$S_5 \rightarrow \alpha_{S_5C} = 2 \quad (88)$$

$$S_6 \rightarrow \alpha_{S_6C} = N/A \quad (89)$$

O tempo médio de serviço para cada região de operação $(E[X_1]_{S_{jA;C}})$ é:

$$E[X_1]_{S_{jA;C}} = \alpha_{S_{jA;C}} (T_{TX1} + T_{ACK1}) \quad (90)$$

O segundo momento da variável aleatória X_1 $(E[X_1^2]_{S_{jA;C}})$ também deve ser obtido para o cálculo do tempo de fila do pacote. Os pacotes transmitidos têm tamanho fixos e, portanto, a variância (σ^2) do comprimento do pacote é nula. Como $\sigma^2 = E[X^2] - E[X]^2$, tem-se que:

$$\sigma^2 = 0 \Rightarrow E[X^2] = E[X]^2 \quad (91)$$

Logo:

$$E[X_1^2]_{S_{j_{A;C}}} = \left[E[X_1]_{S_{j_{A;C}}} \right]^2 \quad (92)$$

4.6.2 Tempo médio de serviço primário para o sistema

O tempo médio de serviço primário para o sistema ($E[X_1]_{A;C}$) é calculado levando-se em conta cada região de operação. Para tal, calcula-se primeiramente um valor médio para a constante $\alpha_{S_{j_{A;C}}}$, utilizando-se da média ponderada pelas probabilidades de ocorrência de cada região de operação:

$$\alpha_A = \frac{\left(\alpha_{S_{1A}} P\{S_1\} + \alpha_{S_{2A}} P\{S_2\} + \alpha_{S_{3A}} P\{S_3\} \right. \\ \left. + \alpha_{S_{4A}} P\{S_4\} + \alpha_{S_{5A}} P\{S_5\} \right)}{1 - P\{S_6\}} \quad (93)$$

$$\alpha_C = \frac{\left(\alpha_{S_{1C}} P\{S_1\} + \alpha_{S_{2'C}} P\{S_2'\} \right) \\ + \alpha_{S_{4C}} P\{S_4\} + \alpha_{S_{5C}} P\{S_5\}}{1 - P\{S_6\}} \quad (94)$$

O tempo médio de serviço primário para o sistema é, portanto, dado por:

$$E[X_1]_{A;C} = \alpha_{A;C} (T_{TX_1} + T_{ACK_1}) \quad (95)$$

O segundo momento da variável aleatória X_1 é:

$$E[X_1^2]_{A;C} = \beta_{A;C} (T_{TX_1} + T_{ACK_1})^2 \quad (96)$$

em que $\beta_{A;C}$ é calculado da mesma forma que $\alpha_{A;C}$:

$$\beta_A = \frac{\left(\alpha_{S_{1A}}^2 P\{S_1\} + \alpha_{S_{2A}}^2 P\{S_2\} + \alpha_{S_{3A}}^2 P\{S_3\} \right) \\ + \alpha_{S_{4A}}^2 P\{S_4\} + \alpha_{S_{5A}}^2 P\{S_5\}}{1 - P\{S_6\}} \quad (97)$$

$$\beta_C = \frac{\left(\alpha_{S_{1C}}^2 P\{S_1\} + \alpha_{S_{2'C}}^2 P\{S_2'\} \right) \\ + \alpha_{S_{4C}}^2 P\{S_4\} + \alpha_{S_{5C}}^2 P\{S_5\}}{1 - P\{S_6\}} \quad (98)$$

4.6.3 Tempo de fila primário

O tempo de fila para o sistema ($T_{W_{1A;C}}$) é calculado utilizando-se do segundo momento da variável aleatória X_1 ($E[X_1^2]_{A;C}$).

O tempo de fila é dado por:

$$T_{W_{1A;C}} = \frac{\lambda_1 E[X_1^2]_{A;C}}{2(1 - \rho_1)} = \frac{\lambda_1 \beta_{A;C} (T_{TX_1} + T_{ACK_1})^2}{2(1 - \rho_1)} \quad (99)$$

Pela definição da teoria de filas, tem-se que:

$$\lambda_1 = \frac{\rho_1}{E[X_1]_{A;C}} \Rightarrow \rho_1 = \lambda_1 E[X_1]_{A;C} \quad (100)$$

Logo:

$$T_{W_{1A;C}} = \frac{\lambda_1 [E[X_1]_{A;C}]^2}{2(1 - \lambda_1 E[X_1]_{A;C})} = \frac{\lambda_1 \beta_{A;C} (T_{TX_1} + T_{ACK_1})^2}{2(1 - \lambda_1 \alpha_{A;C} (T_{TX_1} + T_{ACK_1}))} \quad (101)$$

4.6.4 Atraso total primário

O atraso total primário para o sistema nos modos agressivo e conservador é calculado somando-se o tempo médio de serviço do sistema ($E[X_1]_{A;C}$) e o tempo de fila do sistema ($T_{W_{1A;C}}$):

$$T_{Q_{1A;C}} = E[X_1]_{A;C} + T_{W_{1A;C}} \quad (102)$$

4.7 Usuário secundário

4.7.1 Tempo médio de serviço secundário para cada região de operação

O tempo médio de serviço ($E[X_2]_{S_{jA;C}}$) está relacionado com o *throughput* do usuário secundário de acordo com a região de operação em que se encontra e a probabilidade de ocorrência desta. Deve-se levar em conta que o usuário secundário

não possui retransmissão no modelo SHARP. Contudo, será considerado um protocolo de retransmissão na camada de aplicação para o cálculo do atraso, de forma que o pacote é retransmitido indefinidamente até que seja recebido corretamente.

A probabilidade de *outage* (P^{OS}) do usuário secundário está diretamente relacionada com o *threshold* (γ_s) e é calculada conforme a Eq. (69).

Da mesma forma que anteriormente, o sistema permanece com *throughput* fixo até que as condições de canal mudem para outra região de operação. Abaixo está relacionado o tempo de transmissão de cada pacote secundário ($T_{TX_2 S_j A;C}$) de acordo com a região de operação:

Agressivo:

$$S_1 \rightarrow T_{TX_2 S_1 A} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (103)$$

$$S_2 \rightarrow T_{TX_2 S_2 A} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (104)$$

$$S_3 \rightarrow T_{TX_2 S_3 A} = 2(T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (105)$$

$$S_4 \rightarrow T_{TX_2 S_4 A} = 2(T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (106)$$

$$S_5 \rightarrow N/A \quad (107)$$

$$S_6 \rightarrow T_{TX_2 S_6 A} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (108)$$

Conservador:

$$S_1 \rightarrow T_{TX_2 S_1 C} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (109)$$

$$S_2' \rightarrow T_{TX_2 S_2' C} = N/A \quad (110)$$

$$S_4 \rightarrow T_{TX_2 S_4 C} = 2(T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (111)$$

$$S_5 \rightarrow N/A \quad (112)$$

$$S_6 \rightarrow T_{TX_2 S_6 C} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (113)$$

Após encontrada a região de operação, o usuário secundário transmite os pacotes com uma probabilidade de *outage* (P^{OS}) e retransmite os pacotes errados até que cheguem corretamente no receptor. O tempo médio de serviço para cada região de operação pode ser calculado por:

$$\begin{aligned}
E[X_2]_{S_{jA;C}} &= \left\{ \sum_{N_r=0}^{\infty} (N_r + 1) \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right) (P^{os})^{N_r} (1 - P^{os}) \right\} \\
&= (1 - P^{os}) \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right) \left\{ \sum_{N_r=0}^{\infty} (N_r + 1) (P^{os})^{N_r} \right\} \\
&= (1 - P^{os}) \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right) \left\{ \sum_{N_r=0}^{\infty} N_r (P^{os})^{N_r} + \sum_{N_r=0}^{\infty} (P^{os})^{N_r} \right\}
\end{aligned} \tag{114}$$

em que N_r é o número de retransmissões secundárias.

Para determinar o tempo médio de serviço de cada região de operação, pode-se utilizar as seguintes convergências conhecidas de séries infinitas [18]:

$$\sum_{n=0}^{\infty} na^n = \frac{a}{(a-1)^2}, |a| < 1 \tag{115}$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} a^n = \frac{1}{1-a}, |a| < 1 \tag{116}$$

Logo:

$$\begin{aligned}
E[X_2]_{S_{jA;C}} &= (1 - P^{os}) \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right) \left[\left(\frac{P^{os}}{(P^{os} - 1)^2} \right) + \left(\frac{1}{1 - P^{os}} \right) \right] \\
&+ \\
&= (1 - P^{os}) \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right) \left(\frac{P^{os}}{(P^{os} - 1)^2} \right) + \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right) \\
&= \left[\left(\frac{P^{os}}{(-1)^2 (1 - P^{os})^2} \right) (1 - P^{os}) + 1 \right] \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right) \\
&= \left(\frac{P^{os}}{1 - P^{os}} + 1 \right) \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right) \\
&= \left(\frac{P^{os} + 1 - P^{os}}{1 - P^{os}} \right) \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right) \\
&= \frac{\left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right)}{1 - P^{os}}
\end{aligned} \tag{117}$$

O segundo momento da variável aleatória X_2 é definido por:

$$\begin{aligned} E[X_2^2]_{S_{jA;C}} &= \left\{ \sum_{N_r=0}^{\infty} \left[(N_r + 1) T_{TX_2 S_{jA;C}} \right]^2 (P^{os})^{N_r} (1 - P^{os}) \right\} \\ &= (1 - P^{os}) \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right)^2 \left\{ \sum_{N_r=0}^{\infty} (N_r + 1)^2 (P^{os})^{N_r} \right\} \end{aligned} \quad (118)$$

A seguinte série infinita também tem convergência conhecida [18]:

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n + 1)^2 a^n = \frac{a + 1}{(1 - a)^3}, |a| < 1 \quad (119)$$

Portanto,

$$\begin{aligned} E[X_2^2]_{S_{jA;C}} &= (1 - P^{os}) \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^3} \right] \\ &= \left(T_{TX_2 S_{jA;C}} \right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right] \end{aligned} \quad (120)$$

4.7.2 Tempo médio de serviço secundário para o sistema

O tempo médio de serviço secundário ($E[X_2]_{A;C}$) é calculado como anteriormente, fazendo-se a média ponderada com base nas probabilidades de ocorrência das regiões de operação:

$$\begin{aligned} E[X_2]_A &= \frac{\left[\left(\frac{T_{TX_2 S_{1A}}}{1 - P^{os}} \right) P\{S_1\} + \left(\frac{T_{TX_2 S_{2A}}}{1 - P^{os}} \right) P\{S_2\} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{T_{TX_2 S_{3A}}}{1 - P^{os}} \right) P\{S_3\} + \left(\frac{T_{TX_2 S_{4A}}}{1 - P^{os}} \right) P\{S_4\} + \left(\frac{T_{TX_2 S_{6A}}}{1 - P^{os}} \right) P\{S_6\} \right]}{1 - P\{S_5\}} \\ &= \left(\frac{P\{S_1\} + P\{S_2\} + 2P\{S_3\} + 2P\{S_4\} + 1P\{S_6\}}{1 - P\{S_5\}} \right) \left(\frac{T_{TX_2} + T_{ACK_2}}{1 - P^{os}} \right) \end{aligned} \quad (121)$$

$$\begin{aligned}
E[X_2]_C &= \frac{\left[\left(\frac{T_{TX_2 S_{1C}}}{1 - P^{os}} \right) P\{S_1\} + \left(\frac{T_{TX_2 S_{4C}}}{1 - P^{os}} \right) P\{S_4\} + \left(\frac{T_{TX_2 S_{6C}}}{1 - P^{os}} \right) P\{S_6\} \right]}{1 - P\{S_2'\} - P\{S_5\}} \\
&= \left(\frac{P\{S_1\} + 2P\{S_4\} + P\{S_6\}}{1 - P\{S_2'\} - P\{S_5\}} \right) \left(\frac{T_{TX_2} + T_{ACK_2}}{1 - P^{os}} \right)
\end{aligned} \tag{122}$$

O segundo momento para o tempo médio de serviço para o sistema é calculado realizando-se a média ponderada com base nas probabilidades de ocorrência das regiões de operação e o resultado da Eq. (120):

$$\begin{aligned}
E[X_2^2]_A &= \frac{\left[\begin{aligned} &\left(T_{TX_2 S_{1A}} \right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right] P\{S_1\} \\ &+ \left(T_{TX_2 S_{2A}} \right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right] P\{S_2\} \\ &+ \left(T_{TX_2 S_{3A}} \right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right] P\{S_3\} \\ &+ \left(T_{TX_2 S_{4A}} \right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right] P\{S_4\} \\ &+ \left(T_{TX_2 S_{6A}} \right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right] P\{S_6\} \end{aligned} \right]}{1 - P\{S_5\}} \\
&= \left(\frac{P\{S_1\} + P\{S_2\} + 4P\{S_3\} + 4P\{S_4\} + P\{S_6\}}{1 - P\{S_5\}} \right) \left(\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right) (T_{TX_2} + T_{ACK_2})^2
\end{aligned} \tag{123}$$

$$\begin{aligned}
E[X_2^2]_C &= \frac{\left[\begin{aligned} &\left(T_{TX_2 S_{1C}} \right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right] P\{S_1\} \\ &+ \left(T_{TX_2 S_{4C}} \right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right] P\{S_4\} \\ &+ \left(T_{TX_2 S_{6C}} \right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right] P\{S_6\} \end{aligned} \right]}{1 - P\{S_2'\} - P\{S_5\}} \\
&= \left(\frac{P\{S_1\} + 4P\{S_4\} + P\{S_6\}}{1 - P\{S_2'\} - P\{S_5\}} \right) \left(\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right) (T_{TX_2} + T_{ACK_2})^2
\end{aligned} \tag{124}$$

4.7.3 Tempo de fila secundário

O tempo de fila para o sistema ($T_{W_{2A;C}}$) é calculado utilizando-se do segundo momento da variável aleatória X_2 ($E[X_2^2]_{A;C}$).

O tempo de fila é dado por:

$$T_{W_{2A;C}} = \frac{\lambda_2 E[X_2^2]_{A;C}}{2(1 - \rho_2)} \quad (125)$$

Pela definição da teoria de filas, tem-se que:

$$\lambda_2 = \frac{\rho_2}{E[X_2]_{A;C}} \Rightarrow \rho_2 = \lambda_2 E[X_2]_{A;C} \quad (126)$$

Logo:

$$T_{W_{2A;C}} = \frac{\lambda_2 E[X_2^2]_{A;C}}{2(1 - \lambda_2 E[X_2]_{A;C})} \quad (127)$$

4.7.4 Atraso total secundário

O atraso total secundário para o sistema nos modos agressivo e conservador é calculado somando-se o tempo médio de serviço do sistema ($E[X_2]_{A;C}$) e o tempo de fila do sistema ($T_{W_{2A;C}}$):

$$T_{Q_{2A;C}} = E[X_2]_{A;C} + T_{W_{2A;C}} \quad (128)$$

4.8 Resultados numéricos

Resultados numéricos de diferentes cenários para o atraso em transmissões primárias e secundárias são apresentados nesta seção. Da mesma forma que anteriormente, todos os canais (primário, secundário e enlace cruzado) seguem uma distribuição *Rayleigh*. Caso não seja mencionado, a potência de transmissão primária e secundária, assim como a variância do ruído Gaussiano N , são, por definição, iguais à unidade. Os pacotes de dados (l_1 e l_2) e os pacotes ACK (l_{ACK_1} e l_{ACK_2}) possuem

tamanhos normalizados de 1 e 0.1 respectivamente. A largura de banda também é normalizada com a unidade para simplificação. Por definição, a taxa de chegadas de pacotes (λ_1 e λ_2) foi arbitrariamente escolhida para ser 0.1. As eficiências espectrais nominais primária (R_p) e secundária (R_s) são de 1 (bits/s/Hz) e 0.5 (bits/s/Hz), respectivamente. Em cada caso, as médias dos ganhos de canal (definidas como $g_{ij} \triangleq \lambda_{ij}x_{ij}$ de acordo com o modelo do sistema da Figura 01) podem assumir valores específicos. Caso não seja mencionado, considera-se os valores de $\lambda_{11} = \lambda_{22} = 4$ e $\lambda_{21} = 1$.

É importante também destacar que os resultados numéricos do atraso total são normalizados com relação ao tempo de transmissão do pacote de dados para os usuários primário e secundário. Em todos os casos analisados, o tempo de serviço é mais significativo que o tempo de fila na composição do atraso visto que os parâmetros utilizados são compostos por taxas de transmissão bem próximas do tamanho do pacote de dados.

A Figura 14 ilustra a variação do atraso total dos usuários primário e secundário com relação à potência de transmissão do usuário secundário (P_s).

Pelos resultados apresentados, pode-se concluir que o usuário primário possui um maior atraso com o modo agressivo à medida que a potência de transmissão secundária avança. Isto ocorre pois, com o aumento da interferência, um maior número de retransmissões deverão ocorrer. O atraso para o modo conservador permanece estático, visto que, por definição, o usuário secundário não pode transmitir caso influencie no *throughput* primário.

O atraso para o usuário secundário, por sua vez, é altamente influenciado por sua potência de transmissão, já que a probabilidade de *outage* (P_{os}) depende exclusivamente disto e é a grande responsável pelo atraso. Com condições melhores de potência de transmissão, o atraso tende a diminuir de forma geral no modo conservador pois ocorrerão menos retransmissões. No modo agressivo, algo interessante acontece, o atraso diminui com o aumento de P_s até o ponto em que a interferência causada no primário prevalece, e o atraso volta a crescer.

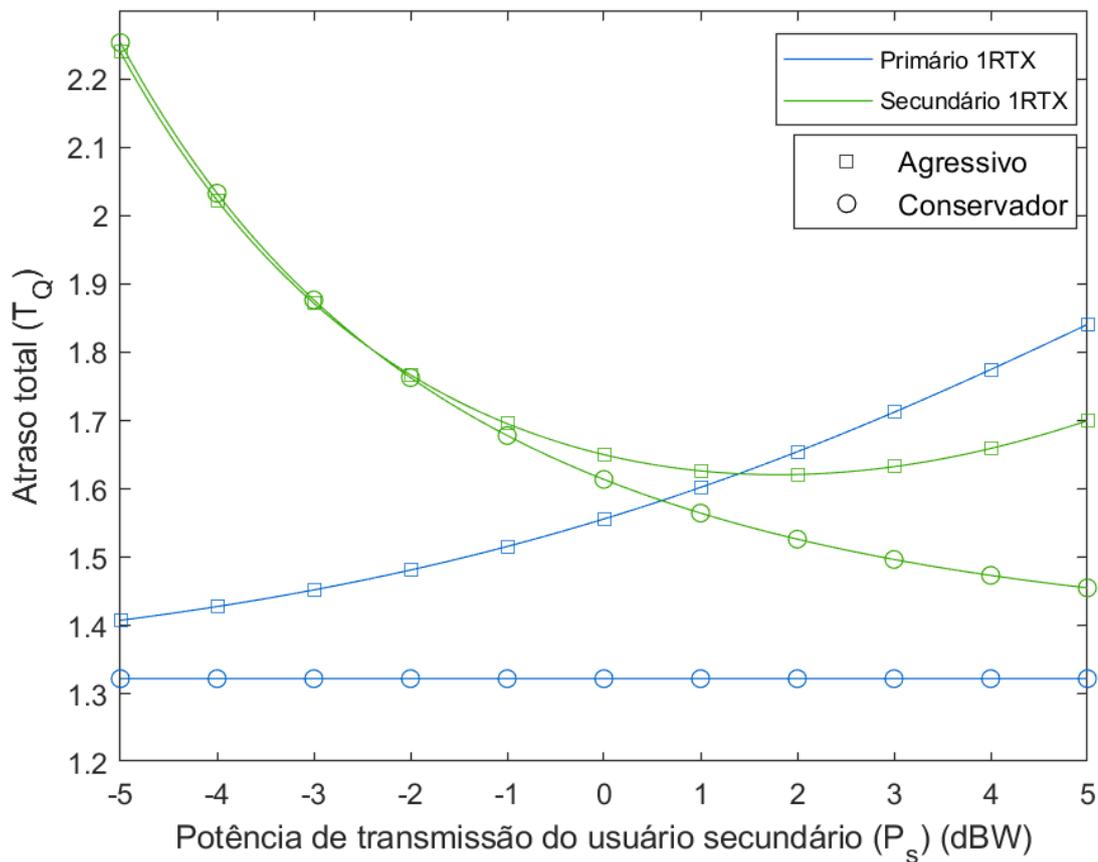


Figura 14 – Atraso total vs. P_s para uma retransmissão primária

O próximo cenário explora a influência da taxa de entrada de pacotes do canal primário (λ_1) no atraso das transmissões primária e secundária. A média do ganho de canal cruzado entre o transmissor primário e o receptor secundário é $\lambda_{12} = 4$. A Figura 15 ilustra este caso.

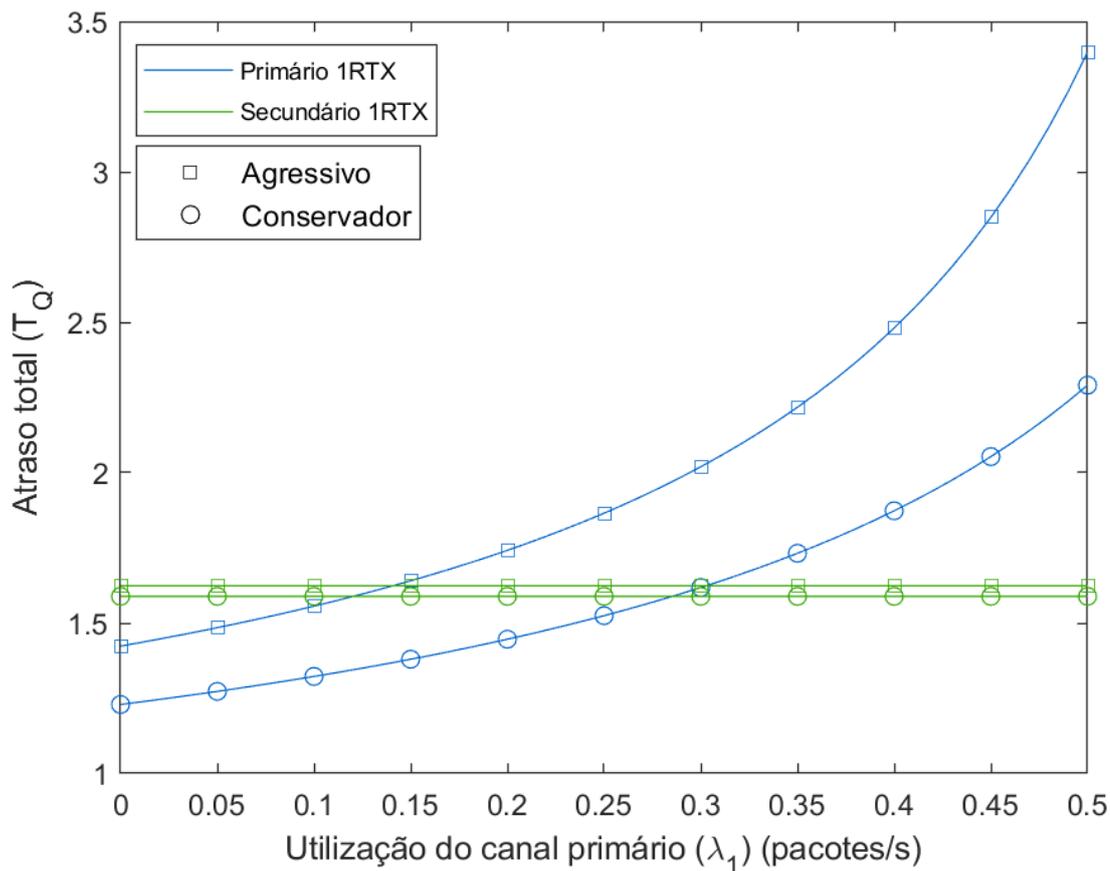


Figura 15 – Atraso total vs. λ_1 para uma retransmissão primária

Como esperado, aumentar a taxa de entrada de pacotes no sistema (λ_1) influencia negativamente todas as transmissões do usuário primário. Para os parâmetros normalizados, a entrada de pacotes acima de 0.5 (pacotes/s) levará o sistema próximo da instabilidade, com o atraso nas transmissões aumentando cada vez mais. Valores menores para λ_1 apresentam uma diminuição no atraso total.

As transmissões secundárias permanecem indiferentes pois não são influenciadas pelo canal primário. O atraso permanece constante neste caso.

A Figura 16 mostra a influência da taxa de entrada de pacotes do canal secundário (λ_2) no atraso das transmissões primária e secundária. A média do ganho de canal cruzado entre o transmissor primário e o receptor secundário é $\lambda_{12} = 4$.

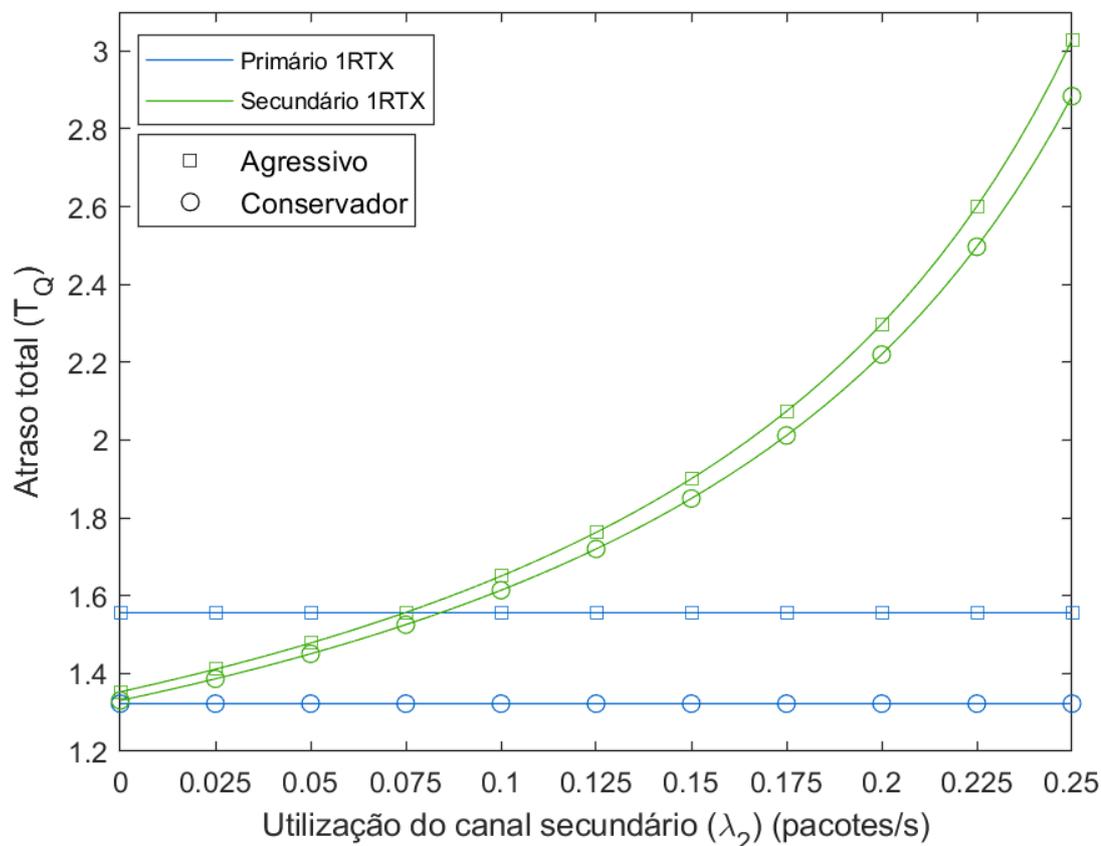


Figura 16 – Atraso total vs. λ_2 para uma retransmissão primária

Novamente, aumentar a taxa de entrada de pacotes no sistema (λ_2) influencia negativamente todas as transmissões do usuário secundário. Para os parâmetros normalizados, a entrada de pacotes acima de 0.25 (pacotes/s) levará o sistema próximo da instabilidade, com o atraso nas transmissões aumentando cada vez mais. Valores menores para λ_2 apresentam uma diminuição no atraso total.

As transmissões primárias permanecem indiferentes pois não são influenciadas pelo canal secundário. O atraso permanece constante neste caso.

A Figura 17 explora o comportamento do sistema ao variar-se o tamanho dos pacotes de dados primários (l_1).

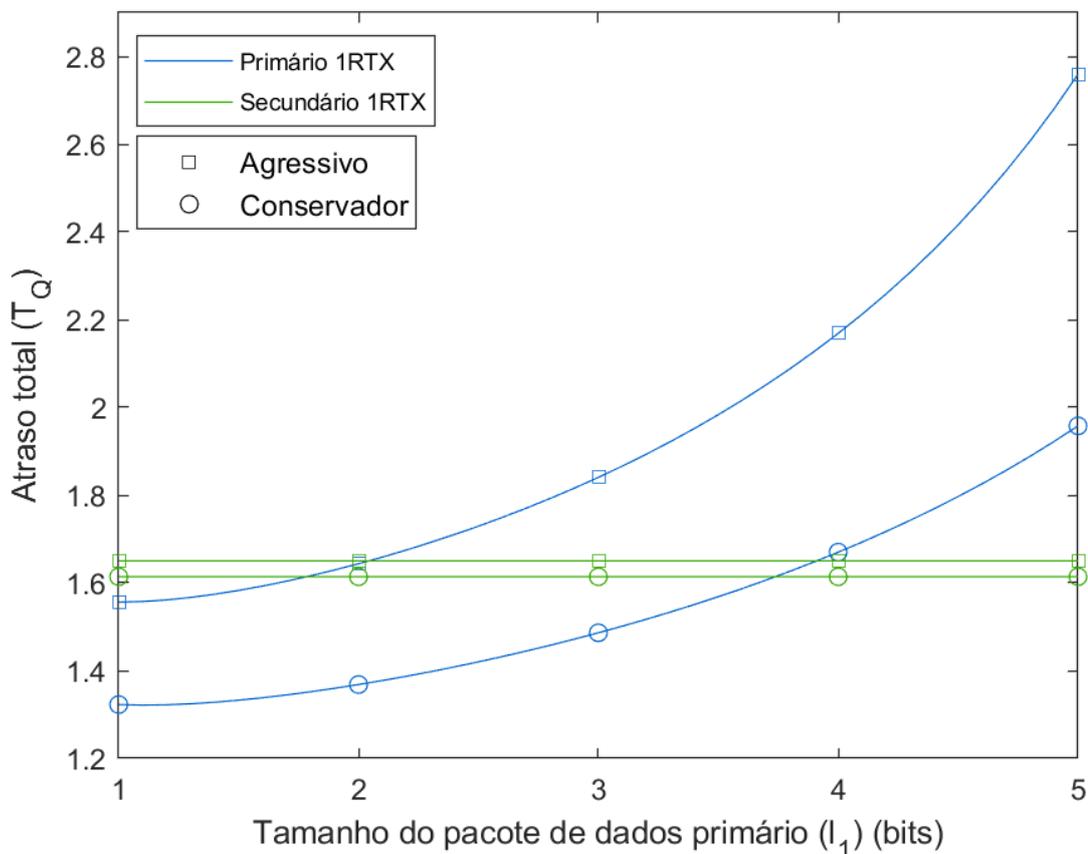


Figura 17 – Atraso total vs. l_1 para uma retransmissão primária

O aumento do tamanho do pacote de dados primário (l_1) resulta em um maior tempo necessário para a transmissão do mesmo pacote, além de também crescer o tempo de serviço, o tempo de fila e a ocupação do canal. Conseqüentemente, quanto maior o pacote, pior será o atraso primário.

As transmissões secundárias permanecem indiferentes pois não são influenciadas pelo pacote de dados primário. O atraso permanece constante neste caso.

Da mesma forma, a Figura 18 explora o comportamento do sistema ao variar-se o tamanho dos pacotes de dados secundário (l_2).

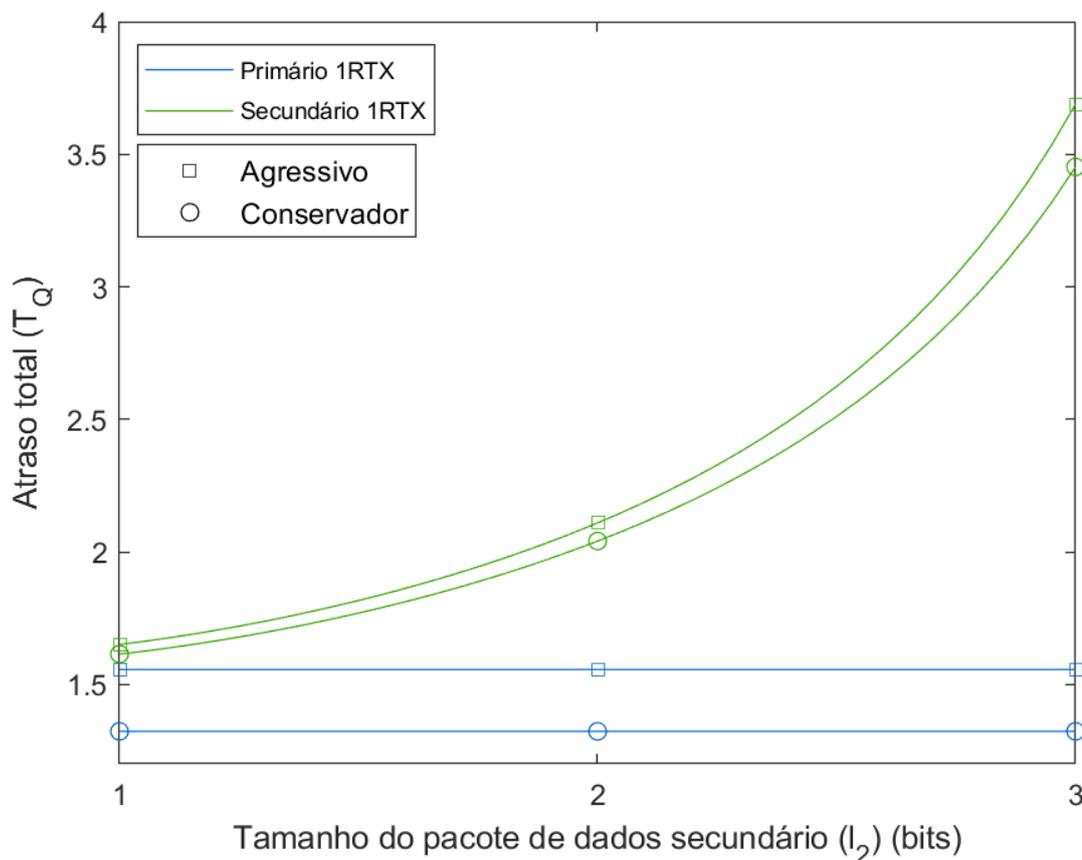


Figura 18 – Atraso total vs. l_2 para uma retransmissão primária

Da mesma forma que anteriormente, o aumento do tamanho do pacote de dados primário (l_2) resulta em um maior tempo necessário para a transmissão do mesmo pacote, além de também crescer o tempo de serviço, o tempo de fila e a ocupação do canal. Consequentemente, quanto maior o pacote, pior será o atraso secundário.

As transmissões primárias permanecem indiferentes pois não são influenciadas pelo pacote de dados secundário. O atraso permanece constante neste caso.

O próximo cenário aborda a influência da eficiência espectral do usuário primário (R_p). A Figura 19 abaixo mostra a variação do atraso, enquanto que a Figura 20 apresenta o que acontece com as probabilidades das regiões de operação.

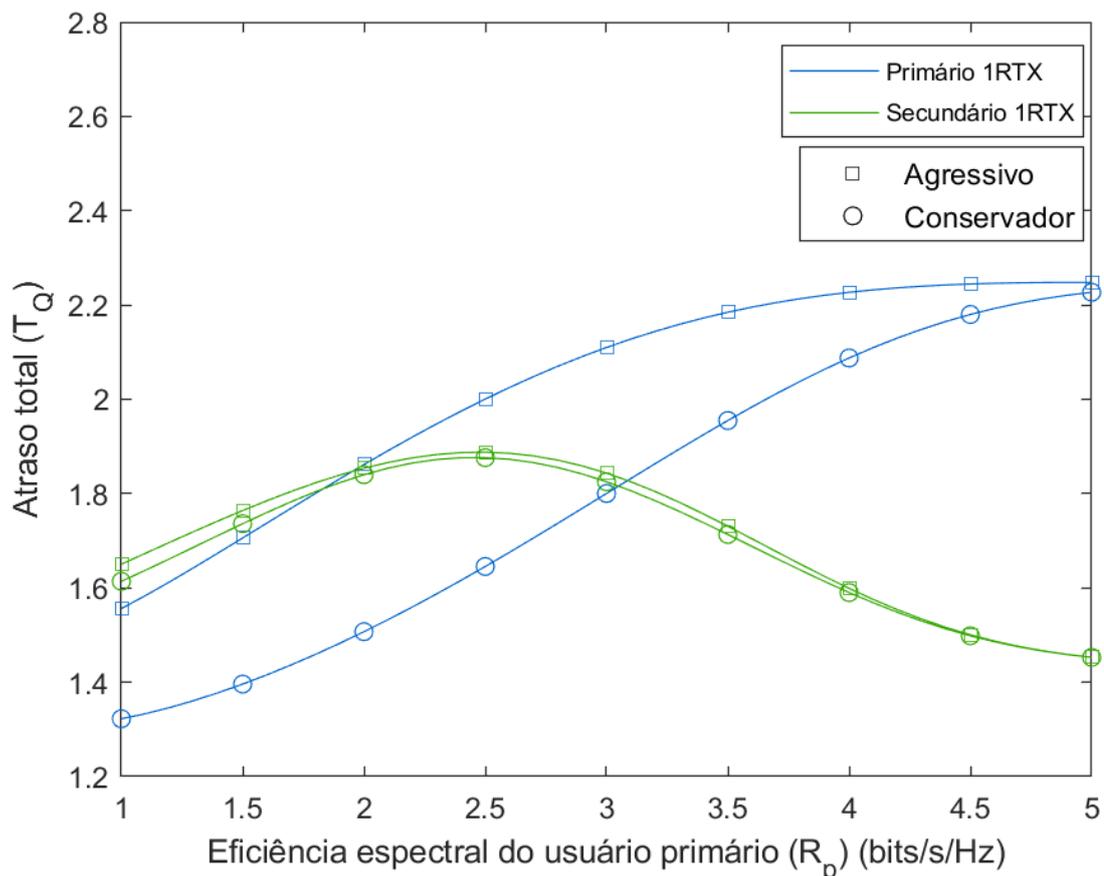


Figura 19 – Atraso total vs. R_p para uma retransmissão primária

Para o usuário primário, aumentar a eficiência espectral significa uma transmissão mais rápida dos pacotes de dados. O resultado esperado seria a diminuição do atraso à medida que a eficiência espectral cresce. Contudo, a probabilidade de *outage* primária ($P\{S_6\}$) sobe consideravelmente, como observado na Figura 20, mostrando que poucos pacotes são efetivamente transmitidos e resultando em um aumento do atraso normalizado.

Algo inusitado acontece com o usuário secundário. Com o aumento de R_p , o atraso tende a aumentar, visto que as melhores oportunidades de transmissão secundárias – como as regiões de operação S_1 e S_2 - ficam mais escassas. No entanto, a partir de certo ponto, a probabilidade de *outage* primária ($P\{S_6\}$) fica tão

significativa que o usuário secundário transmite praticamente sozinho, possibilitando uma redução subsequente no atraso normalizado.

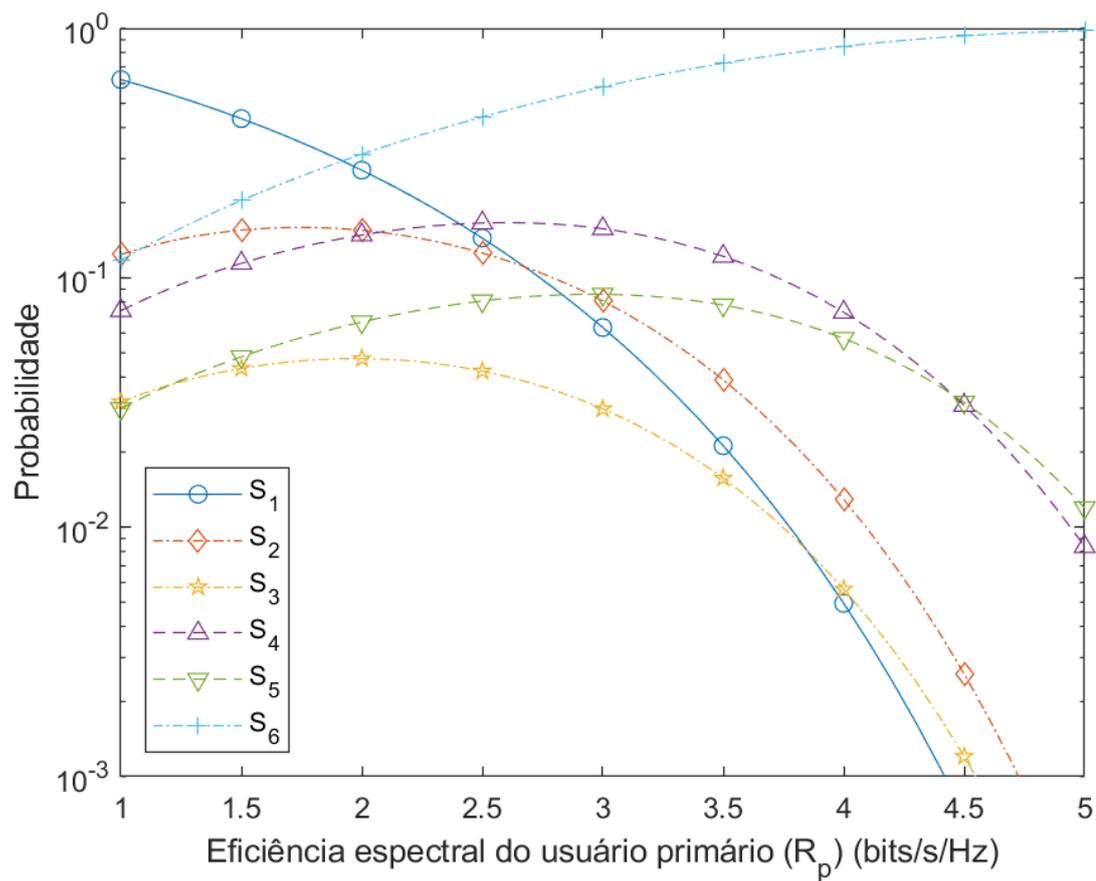


Figura 20 – Probabilidade vs. R_p para uma retransmissão primária

Por último, a Figura 21 apresenta a evolução do atraso de acordo com a potência de transmissão primária (P_p). Para complementar a visualização, a Figura 22 mostra as probabilidades das regiões de operação.

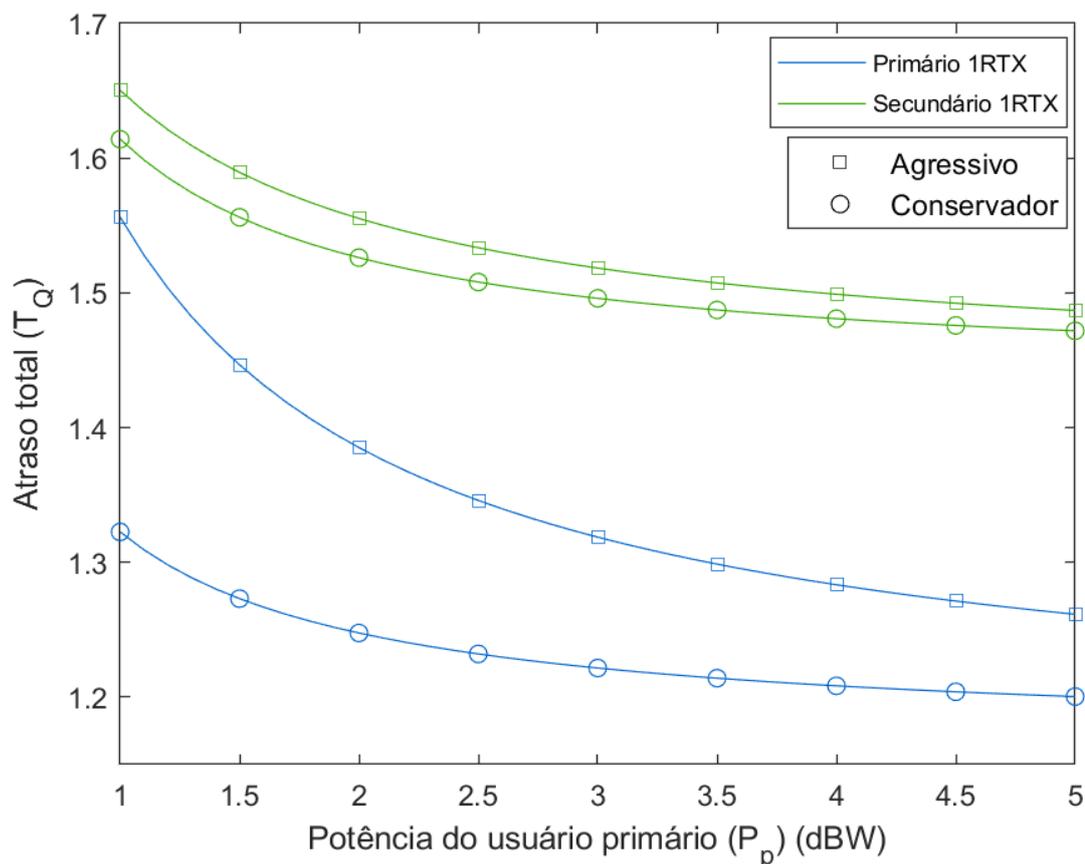


Figura 21 – Atraso total vs. P_p para uma retransmissão primária

De forma geral, o aumento da potência de transmissão do usuário primário diminui o atraso tanto do usuário primário, quanto do secundário, devido a melhores condições de transmissão. A região de operação S_1 (melhor condição possível para ambos os usuários) prevalece e é diretamente beneficiada com o aumento de P_p .

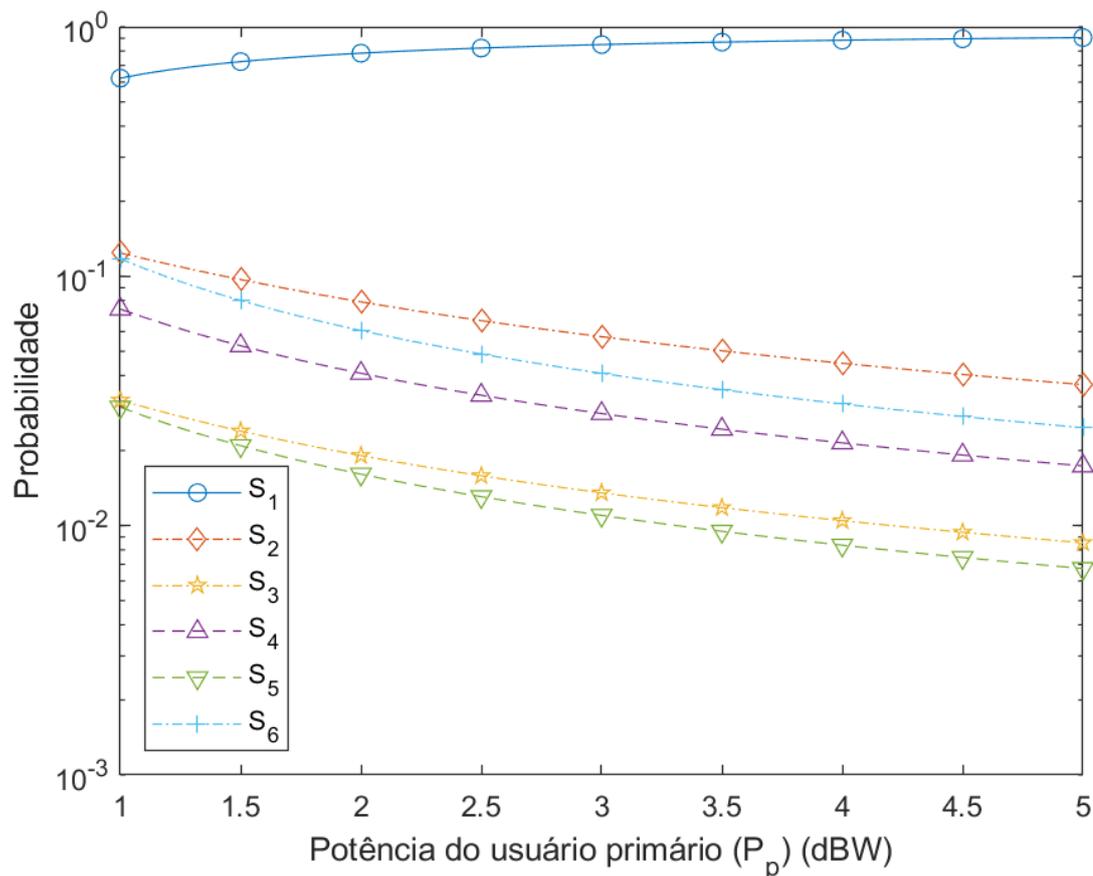


Figura 22 – Probabilidade vs. P_p para uma retransmissão primária

4.9 Conclusão

Neste capítulo foi adicionado uma nova variável de estudo na operação do SHARP original: o atraso nas transmissões primária e secundária. Foram analisados diferentes cenários, cada um impactando de forma diferente no atraso do sistema.

Observando os resultados de forma geral, nota-se que o atraso é composto por diferentes variáveis, responsáveis por determinar o desempenho do sistema. A potência de transmissão do usuário secundário, o tamanho e a taxa de entrada dos pacotes no canal devem ser levados em consideração, dado que interferem diretamente nas transmissões, tanto primárias, quanto secundárias. A taxa e a potência de transmissão primárias, por estarem relacionadas com o *threshold* do sistema (γ_p), também influenciam no atraso. Por fim, as regiões e os modos de operação são decisivos para o atraso, variando de acordo com a interferência e os ganhos do canal.

5 SHARP COM ATRASO PARA DUAS RETRANSMISSÕES

Propõe-se neste capítulo analisar também os efeitos do atraso para o caso do SHARP com duas retransmissões proposto no Capítulo 3. Da mesma forma que no capítulo anterior, observa-se o impacto no *throughput* das transmissões e o comportamento do atraso em sinais com baixa relação sinal-ruído. Os gráficos apresentados nos resultados numéricos repetem os mesmos cenários estudados anteriormente, porém com a possibilidade de mais retransmissões para o usuário primário.

5.1 Modelo do sistema

O modelo do sistema utilizado mantém-se inalterado em relação ao ilustrado anteriormente na Figura 01, onde usuários primário e secundário compartilham do mesmo canal e possuem potências de transmissão e taxas já previamente definidas. As transmissões são caracterizadas pelos mesmos parâmetros de ganho e *threshold*.

5.2 Regiões de operação

As regiões de operação seguem as mesmas definições apresentadas na Subseção 3.2, sendo um total de dez regiões de operação encontradas com suas respectivas probabilidades de ocorrência.

5.3 Modos de operação

Os modos de operação agressivo e conservador seguem a mesma descrição de anteriormente, definindo como o usuário secundário deve transmitir de acordo com a região de operação em que se encontra.

5.4 Fluxograma

O algoritmo de detecção da região de operação segue o mesmo fluxograma da Subseção 3.4 e utiliza o mesmo mecanismo de detecção.

5.5 Análise do atraso

Nesta subseção, será calculado o atraso para transmitir um pacote com sucesso nas redes primária e secundária. Assim como anteriormente, considera-se que o canal permaneça em desvanecimento lento durante um tempo suficiente para que o período transiente (identificação da região) possa ser desconsiderado. O atraso médio é calculado utilizando as probabilidades de ocorrência das regiões de operação.

As mesmas variáveis são consideradas, como o tempo de transmissão do pacote de dados, o tempo de transmissão do pacote ACK, o tempo de retransmissão e o tempo de fila de espera do pacote.

5.6 Usuário primário

Para o cálculo do atraso total do usuário primário, determina-se primeiramente o tempo médio de serviço e em seguida o tempo de fila.

5.6.1 Tempo médio de serviço primário para cada região de operação

O tempo médio de serviço $(E[X_1]_{S_{j_{A;C}}})$ é o tempo efetivo para a transmissão correta dos pacotes em cada região de operação, com exceção da região S_{10} – situação em que o usuário primário transmite e retransmite sem sucesso cada pacote enviado, pois encontra-se em *outage*. No regime permanente, o sistema permanece com *throughput* fixo até que as condições de canal mudem para outra região de operação.

Define-se uma constante $\alpha_{S_{j_{A;C}}}$ para representar o número de transmissões necessárias de cada pacote transmitido corretamente em determinada região de operação. Esta constante é obtida observando-se o fluxograma de operação apresentado na Seção 3.4. A seguir apresenta-se o valor da constante para cada região de operação nos modos agressivo e conservador:

Agressivo:

$$S_1 \rightarrow \alpha_{S_1A} = 1 \quad (129)$$

$$S_2 \rightarrow \alpha_{S_2A} = 2 \quad (130)$$

$$S_3 \rightarrow \alpha_{S_3A} = 3 \quad (131)$$

$$S_4 \rightarrow \alpha_{S_4A} = 3 \quad (132)$$

$$S_5 \rightarrow \alpha_{S_5A} = 2 \quad (133)$$

$$S_6 \rightarrow \alpha_{S_6A} = 3 \quad (134)$$

$$S_7 \rightarrow \alpha_{S_7A} = 3 \quad (135)$$

$$S_8 \rightarrow \alpha_{S_8A} = 3 \quad (136)$$

$$S_9 \rightarrow \alpha_{S_9A} = 3 \quad (137)$$

$$S_{10} \rightarrow \alpha_{S_{10}A} = N/A \quad (138)$$

Conservador:

$$S_1 \rightarrow \alpha_{S_1C} = 1 \quad (139)$$

$$S_2' \rightarrow \alpha_{S_2'C} = 1 \quad (140)$$

$$S_5 \rightarrow \alpha_{S_5C} = 2 \quad (141)$$

$$S_6' \rightarrow \alpha_{S_6'C} = 2 \quad (142)$$

$$S_8 \rightarrow \alpha_{S_8A} = 3 \quad (143)$$

$$S_9 \rightarrow \alpha_{S_9A} = 3 \quad (144)$$

$$S_{10} \rightarrow \alpha_{S_{10}A} = N/A \quad (145)$$

O tempo médio de serviço para cada região de operação $\left(E[X_1]_{S_{jA;C}}\right)$ é calculado da mesma forma que anteriormente pela Eq. (90).

O segundo momento da variável aleatória $X_1 \left(E[X_1^2]_{S_{jA;C}}\right)$ também deve ser obtido para o cálculo do tempo de fila do pacote e é dado pela Eq. (92).

5.6.2 Tempo médio de serviço primário para o sistema

O tempo médio de serviço primário para o sistema ($E[X_1]_{A;C}$) é calculado levando-se em conta cada região de operação. Para tal, calcula-se primeiramente um valor médio para a constante $\alpha_{S_j A;C}$, utilizando-se da média ponderada pelas probabilidades de ocorrência de cada região de operação:

$$\alpha_A = \frac{\left(\alpha_{S_1 A} P\{S_1\} + \alpha_{S_2 A} P\{S_2\} + \alpha_{S_3 A} P\{S_3\} \right. \\ \left. + \alpha_{S_4 A} P\{S_4\} + \alpha_{S_5 A} P\{S_5\} + \alpha_{S_6 A} P\{S_6\} \right. \\ \left. + \alpha_{S_7 A} P\{S_7\} + \alpha_{S_8 A} P\{S_8\} + \alpha_{S_9 A} P\{S_9\} \right)}{1 - P\{S_{10}\}} \quad (146)$$

$$\alpha_C = \frac{\left(\alpha_{S_1 C} P\{S_1\} + \alpha_{S_2' C} P\{S_2'\} \right. \\ \left. + \alpha_{S_5 C} P\{S_5\} + \alpha_{S_6' C} P\{S_6'\} \right. \\ \left. + \alpha_{S_8 C} P\{S_8\} + \alpha_{S_9 C} P\{S_9\} \right)}{1 - P\{S_{10}\}} \quad (147)$$

O tempo médio de serviço primário para o sistema é dado pela Eq. (95).

O segundo momento da variável aleatória X_1 é calculado pela Eq. (96), em que $\beta_{A;C}$ é calculado conforme abaixo:

$$\beta_A = \frac{\left(\alpha_{S_1 A}^2 P\{S_1\} + \alpha_{S_2 A}^2 P\{S_2\} + \alpha_{S_3 A}^2 P\{S_3\} \right. \\ \left. + \alpha_{S_4 A}^2 P\{S_4\} + \alpha_{S_5 A}^2 P\{S_5\} + \alpha_{S_6 A}^2 P\{S_6\} \right. \\ \left. + \alpha_{S_7 A}^2 P\{S_7\} + \alpha_{S_8 A}^2 P\{S_8\} + \alpha_{S_9 A}^2 P\{S_9\} \right)}{1 - P\{S_{10}\}} \quad (148)$$

$$\beta_C = \frac{\left(\alpha_{S_1 C} P\{S_1\} + \alpha_{S_2' C} P\{S_2'\} \right. \\ \left. + \alpha_{S_4 C} P\{S_4\} + \alpha_{S_5 C} P\{S_5\} \right)}{1 - P\{S_6\}} \quad (149)$$

5.6.3 Tempo de fila primário

O tempo de fila para o sistema ($T_{W_1 A;C}$) é calculado utilizando-se do segundo momento da variável aleatória X_1 ($E[X_1^2]_{A;C}$) e é dado pela Eq. (101).

5.6.4 Atraso total primário

O atraso total primário para o sistema nos modos agressivo e conservador é calculado somando-se o tempo médio de serviço do sistema ($E[X_1]_{A;C}$) e o tempo de fila do sistema ($T_{W1A;C}$), conforme a Eq. (102).

5.7 Usuário secundário

5.7.1 Tempo médio de serviço secundário para cada região de operação

O tempo médio de serviço ($E[X_2]_{S_j A;C}$) está relacionado com o *throughput* do usuário secundário de acordo com a região de operação em que se encontra e a probabilidade de ocorrência desta. Deve-se levar em conta que o usuário secundário não possui retransmissão no modelo SHARP. Contudo, será considerado um protocolo de retransmissão na camada de aplicação para o cálculo do atraso, de forma que o pacote é retransmitido até que seja recebido corretamente.

A probabilidade de *outage* (P^{OS}) do secundário está diretamente relacionada com o *threshold* (γ_s) e é dada pela Eq. (69).

Da mesma forma que anteriormente, o sistema permanece com *throughput* fixo até que as condições de canal mudem para outra região de operação. Abaixo relaciona-se o tempo de transmissão de cada pacote secundário ($T_{TX2S_j A;C}$) de acordo com a região de operação:

Agressivo:

$$S_1 \rightarrow T_{TX_2S_{1A}} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (150)$$

$$S_2 \rightarrow T_{TX_2S_{2A}} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (151)$$

$$S_3 \rightarrow T_{TX_2S_{3A}} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (152)$$

$$S_4 \rightarrow T_{TX_2S_{4A}} = \frac{3}{2}(T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (153)$$

$$S_5 \rightarrow T_{TX_2S_{5A}} = 2(T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (154)$$

$$S_6 \rightarrow T_{TX_2S_{6A}} = \frac{3}{2}(T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (155)$$

$$S_7 \rightarrow T_{TX_2S_{7A}} = 3(T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (156)$$

$$S_8 \rightarrow T_{TX_2S_{8A}} = 3(T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (157)$$

$$S_9 \rightarrow T_{TX_2S_{9A}} = N/A \quad (158)$$

$$S_{10} \rightarrow T_{TX_2S_{10A}} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (159)$$

Conservador:

$$S_1 \rightarrow T_{TX_2S_{1C}} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (160)$$

$$S_2' \rightarrow T_{TX_2S_{2'C}} = N/A \quad (161)$$

$$S_5 \rightarrow T_{TX_2S_{5C}} = 2(T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (162)$$

$$S_6' \rightarrow T_{TX_2S_{6'C}} = N/A \quad (163)$$

$$S_8 \rightarrow T_{TX_2S_{8C}} = 3(T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (164)$$

$$S_9 \rightarrow T_{TX_2S_{9C}} = N/A \quad (165)$$

$$S_{10} \rightarrow T_{TX_2S_{10C}} = (T_{TX_2} + T_{ACK_2}) \quad (166)$$

Após encontrada a região de operação, o usuário secundário transmite os pacotes com uma probabilidade de outage (P^{os}) e retransmite pacotes errados indefinidamente. O tempo médio de serviço para cada região de operação pode ser calculado pela Eq. (117).

5.7.2 Tempo médio de serviço secundário para o sistema

O tempo médio de serviço primário para o sistema ($E[X_2]_{A;C}$) é calculado como anteriormente, fazendo-se a média ponderada com base nas probabilidades de ocorrência das regiões de operação:

$$E[X_2]_A = \frac{\left[\begin{aligned} &\left(\frac{T_{TX2S_{1A}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_1\} + \left(\frac{T_{TX2S_{2A}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_2\} + \left(\frac{T_{TX2S_{3A}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_3\} \\ &\left(\frac{T_{TX2S_{4A}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_4\} + \left(\frac{T_{TX2S_{5A}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_5\} + \left(\frac{T_{TX2S_{6A}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_6\} \\ &+ \left(\frac{T_{TX2S_{7A}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_7\} + \left(\frac{T_{TX2S_{8A}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_8\} + \left(\frac{T_{TX2S_{10A}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_{10}\} \end{aligned} \right]}{1-P\{S_9\}} \quad (167)$$

$$= \left(\frac{P\{S_1\} + P\{S_2\} + P\{S_3\} + \frac{3}{2}P\{S_4\} + 2P\{S_5\} + \frac{3}{2}P\{S_6\} + 3P\{S_7\} + 3P\{S_8\} + P\{S_{10}\}}{1-P\{S_9\}} \right) \left(\frac{T_{TX2} + T_{ACK2}}{1-P_{os}} \right)$$

$$E[X_2]_C = \frac{\left[\begin{aligned} &\left(\frac{T_{TX2S_{1C}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_1\} + \left(\frac{T_{TX2S_{5C}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_5\} \\ &+ \left(\frac{T_{TX2S_{8C}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_8\} + \left(\frac{T_{TX2S_{10C}}}{1-P_{os}}\right)P\{S_{10}\} \end{aligned} \right]}{1-P\{S_2'\} - P\{S_6'\} - P\{S_9\}} \quad (168)$$

$$= \left(\frac{P\{S_1\} + 2P\{S_5\} + 3P\{S_8\} + P\{S_{10}\}}{1-P\{S_2'\} - P\{S_6'\} - P\{S_9\}} \right) \left(\frac{T_{TX2} + T_{ACK2}}{1-P_{os}} \right)$$

O segundo momento para o tempo médio de serviço do sistema, nos modos agressivo e conservador são, respectivamente:

$$E[X_2^2]_A = \frac{\left[\begin{aligned} & \left(T_{TX_2 S_{1A}} \right)^2 \left[\frac{p^{os} + 1}{(1 - p^{os})^2} \right] P\{S_1\} \\ & + \left(T_{TX_2 S_{2A}} \right)^2 \left[\frac{p^{os} + 1}{(1 - p^{os})^2} \right] P\{S_2\} \\ & + \left(T_{TX_2 S_{3A}} \right)^2 \left[\frac{p^{os} + 1}{(1 - p^{os})^2} \right] P\{S_3\} \\ & + \left(T_{TX_2 S_{4A}} \right)^2 \left[\frac{p^{os} + 1}{(1 - p^{os})^2} \right] P\{S_4\} \\ & + \left(T_{TX_2 S_{5A}} \right)^2 \left[\frac{p^{os} + 1}{(1 - p^{os})^2} \right] P\{S_5\} \\ & + \left(T_{TX_2 S_{6A}} \right)^2 \left[\frac{p^{os} + 1}{(1 - p^{os})^2} \right] P\{S_6\} \\ & + \left(T_{TX_2 S_{7A}} \right)^2 \left[\frac{p^{os} + 1}{(1 - p^{os})^2} \right] P\{S_7\} \\ & + \left(T_{TX_2 S_{8A}} \right)^2 \left[\frac{p^{os} + 1}{(1 - p^{os})^2} \right] P\{S_8\} \\ & + \left(T_{TX_2 S_{10A}} \right)^2 \left[\frac{p^{os} + 1}{(1 - p^{os})^2} \right] P\{S_{10}\} \end{aligned} \right]}{1 - P\{S_9\}} \quad (169)$$

$$= \left(\begin{array}{l} P\{S_1\} + P\{S_2\} \\ + P\{S_3\} + \frac{9}{4}P\{S_4\} \\ + 4P\{S_5\} + \frac{9}{4}P\{S_6\} \\ + 9P\{S_7\} + 9P\{S_8\} \\ + P\{S_{10}\} \\ \hline 1 - P\{S_9\} \end{array} \right) \left(\frac{p^{os} + 1}{(1 - p^{os})^2} \right) (T_{TX_2} + T_{ACK_2})^2$$

$$\begin{aligned}
E[X_2^2]_c &= \frac{\left[\begin{aligned} &\left(T_{TX_2S_{1C}}\right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2}\right] P\{S_1\} \\ &+ \left(T_{TX_2S_{5C}}\right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2}\right] P\{S_5\} \\ &+ \left(T_{TX_2S_{8C}}\right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2}\right] P\{S_8\} \\ &+ \left(T_{TX_2S_{10C}}\right)^2 \left[\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2}\right] P\{S_{10}\} \end{aligned} \right]}{1 - P\{S_2'\} - P\{S_6'\} - P\{S_9\}} \quad (170) \\
&= \left(\begin{array}{c} P\{S_1\} + 4P\{S_5\} \\ +9P\{S_8\} + P\{S_{10}\} \\ 1 - P\{S_2'\} - P\{S_6'\} \\ -P\{S_9\} \end{array} \right) \left(\frac{P^{os} + 1}{(1 - P^{os})^2} \right) (T_{TX_2} + T_{ACK_2})^2
\end{aligned}$$

5.7.3 Tempo de fila secundário

O tempo de fila para o usuário secundário ($T_{W_{2A;C}}$) é calculado utilizando-se do segundo momento da variável aleatória X_2 ($E[X_2^2]_{A;C}$) e é dado pela Eq. (127).

5.7.4 Atraso total secundário

O atraso total secundário para o sistema nos modos agressivo e conservador é calculado somando-se o tempo médio de serviço do sistema ($E[X_2]_{A;C}$) e o tempo de fila do sistema ($T_{W_{2A;C}}$), conforme a Eq. (128).

5.8 Resultados numéricos

Resultados numéricos dos mesmos cenários anteriores para o atraso em transmissões primárias e secundárias são apresentados nesta seção. O objetivo é comparar o comportamento do atraso ao permitir-se mais uma retransmissão ao usuário primário. Da mesma forma que anteriormente, todos os canais (primário, secundário e enlace cruzado) seguem uma distribuição *Rayleigh*. Caso não seja mencionado, a potência de transmissão primária e secundária, assim como a variância do ruído Gaussiano N , são, por definição, iguais à unidade. Os pacotes de dados (l_1 e l_2) e os pacotes de ACK (l_{ACK_1} e l_{ACK_2}) possuem tamanhos normalizados de 1

e 0.1, respectivamente. A largura de banda também é normalizada como a unidade, para simplificação. A taxa de chegadas de pacotes (λ_1 e λ_2) foi arbitrariamente escolhida para ser 0.1. As eficiências espectrais nominais primária (R_p) e secundária (R_s) são de 1 (bits/s/Hz) e 0.5 (bits/s/Hz), respectivamente. Em cada caso, as médias dos ganhos de canal (definidas como $g_{ij} \triangleq \lambda_{ij}x_{ij}$, de acordo com o modelo do sistema da Figura 01) podem assumir valores específicos, mas nos cálculos realizados arbitraram-se os valores $\lambda_{11} = \lambda_{22} = 4$ e $\lambda_{21} = 1$.

É importante também destacar que os resultados numéricos do atraso total são normalizados com relação ao tempo de transmissão do pacote de dados para os usuários primário e secundário.

O primeiro resultado retrata o aumento do atraso total dos usuários primário e secundário ao variar-se a potência de transmissão do usuário secundário (P_s). Note na Figura 23 que o atraso mantém o mesmo comportamento de anteriormente, com formato semelhante ao SHARP com apenas uma retransmissão primária. Ao permitir-se uma retransmissão adicional, o atraso recebe um *offset* em relação ao original.

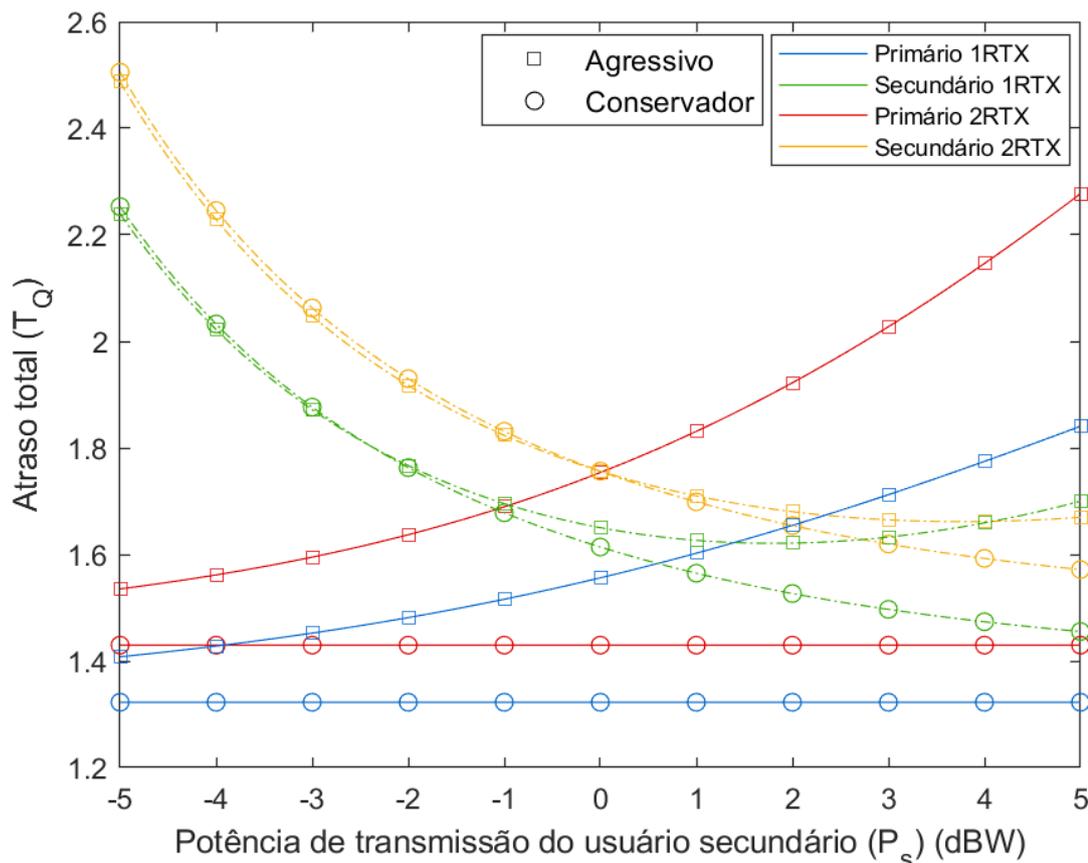


Figura 23 – Atraso total vs. P_s para duas retransmissões primárias

O próximo cenário explora a influência da taxa de entrada de pacotes do canal primário (λ_1) no atraso das transmissões primária e secundária. A média do ganho de canal cruzado entre o transmissor primário e o receptor secundário é $\lambda_{12} = 4$. A Figura 24 ilustra este caso.

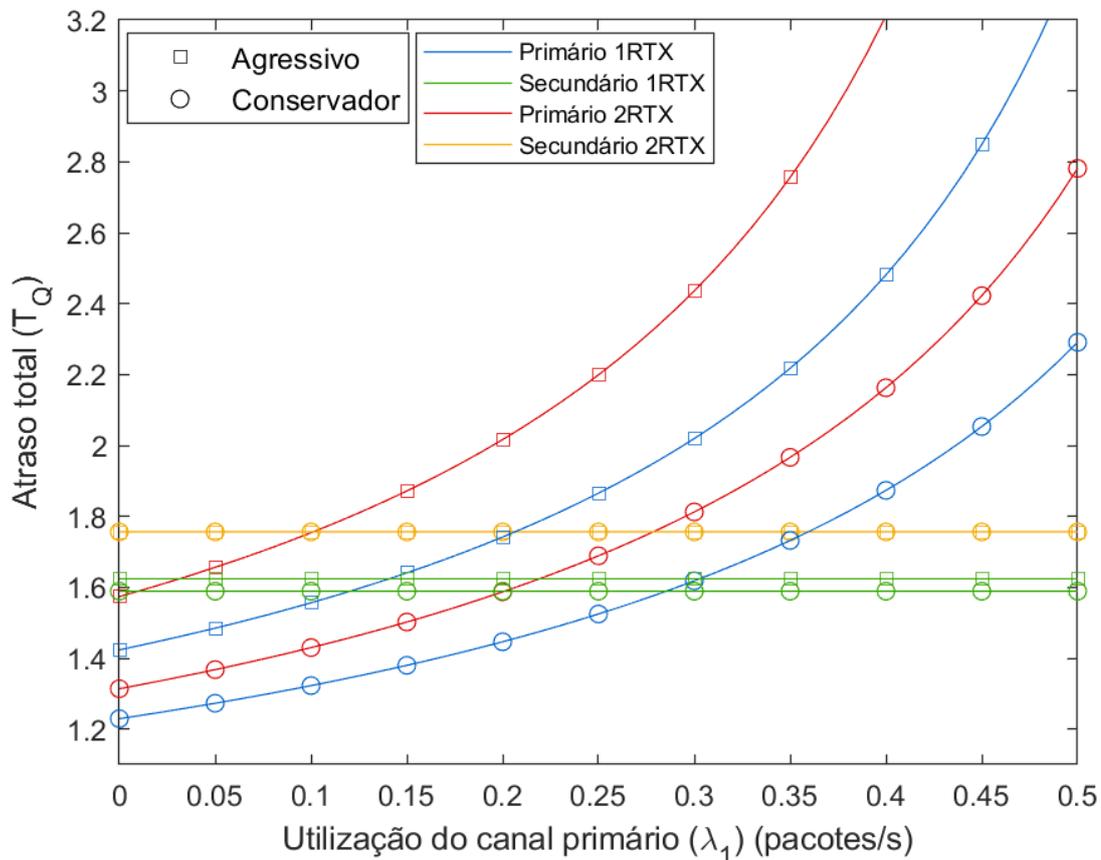


Figura 24 – Atraso total vs. λ_1 para duas retransmissões primárias

Da mesma forma que anteriormente, aumentar a taxa de entrada de pacotes no sistema (λ_1) influencia negativamente todas as transmissões do usuário primário.

As transmissões secundárias permanecem indiferentes pois não são influenciadas pelo canal primário. O atraso permanece constante neste caso, porém maior que no caso de apenas uma retransmissão.

Em comparação com apenas uma retransmissão primária, percebe-se um aumento no atraso do usuário primário, além de uma maior inclinação da curva. Destaca-se o usuário secundário, no qual os modos agressivo e conservador possuem diferença de atraso quase imperceptível e um maior valor com relação a anteriormente.

A Figura 25 mostra a influência da taxa de entrada de pacotes do canal secundário (λ_2) no atraso das transmissões primária e secundária. A média do ganho de canal cruzado entre o transmissor primário e o receptor secundário é $\lambda_{12} = 4$.

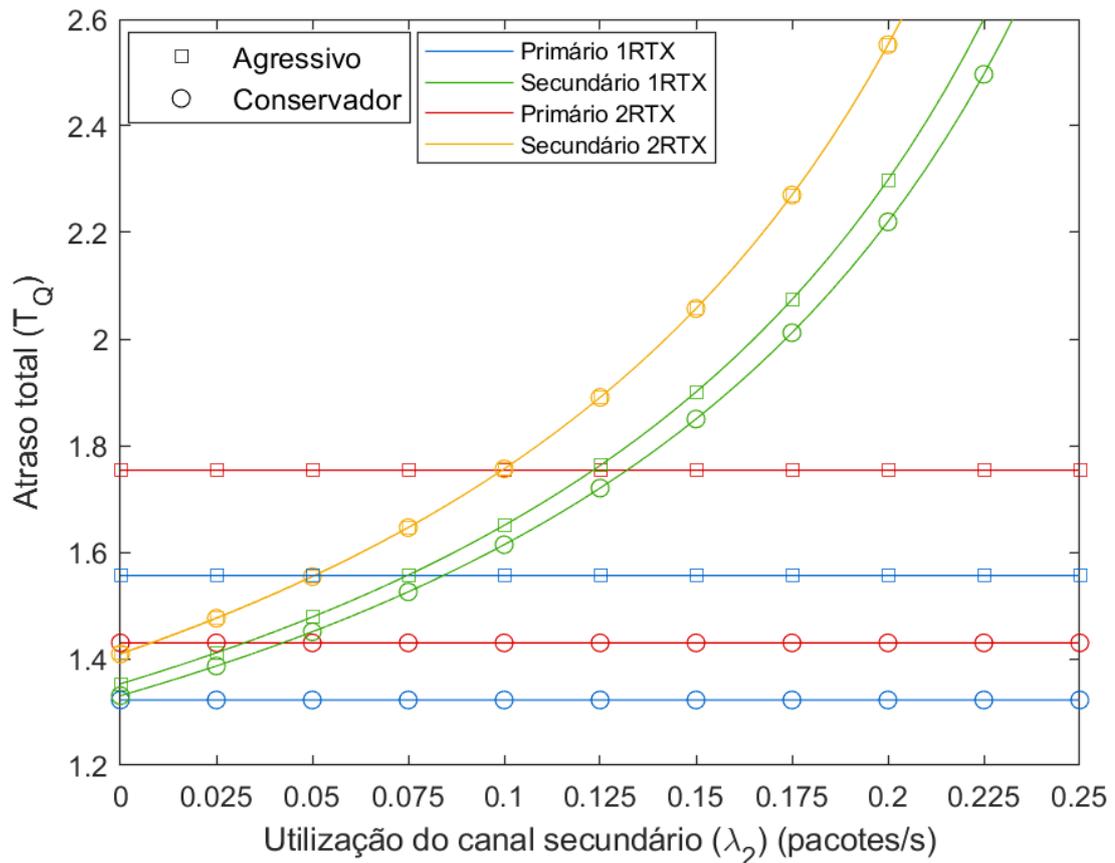


Figura 25 – Atraso total vs. λ_2 para duas retransmissões secundárias

Novamente, aumentar a taxa de entrada de pacotes secundários no sistema (λ_2) influencia negativamente todas as transmissões do usuário secundário. Valores menores para λ_2 apresentam uma diminuição no atraso total.

As transmissões primárias permanecem indiferentes pois não são influenciadas pelo canal secundário. O atraso permanece constante neste caso, porém maior que no caso de apenas uma retransmissão.

Em relação a uma retransmissão, o atraso aumentou, com uma maior inclinação da curva crescente. Da mesma forma que anteriormente, os modos agressivo e conservador no usuário secundário possuem diferença de atraso quase imperceptível.

A Figura 26 explora o comportamento do sistema ao variar-se o tamanho dos pacotes de dados primários (l_1).

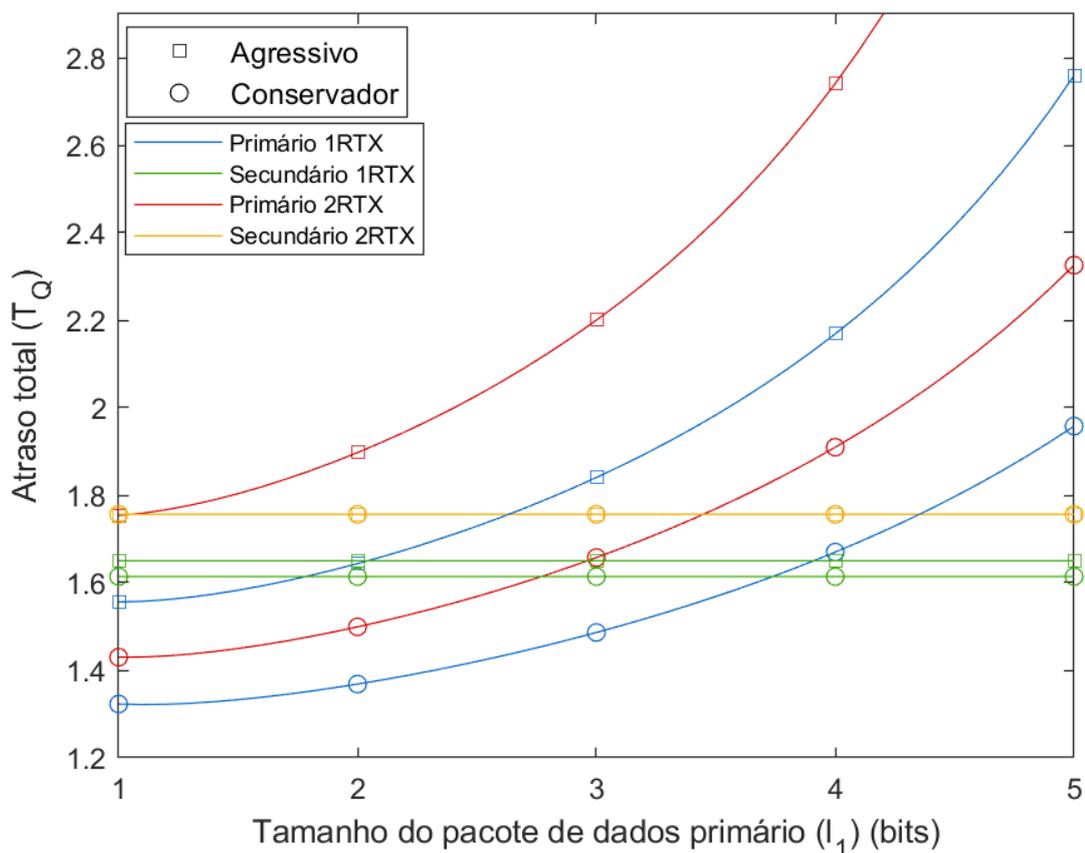


Figura 26 – Atraso total vs. l_1 para duas retransmissões primárias

O aumento do tamanho do pacote de dados primário (l_1) resulta em um maior tempo necessário para a transmissão do mesmo pacote, além de também crescer o tempo de serviço, o tempo de fila e a ocupação do canal. Conseqüentemente, quanto maior o pacote, pior será o atraso primário. As transmissões secundárias permanecem indiferentes pois não são influenciadas pelo tamanho do pacote de dados primário. O atraso permanece constante neste caso, porém maior que no caso de apenas uma retransmissão.

Com duas retransmissões, o atraso aumenta em relação a apenas uma retransmissão devido à influência ainda maior do tamanho do pacote neste caso.

A Figura 27 explora o comportamento do sistema ao variar-se o tamanho dos pacotes de dados secundário (l_2).

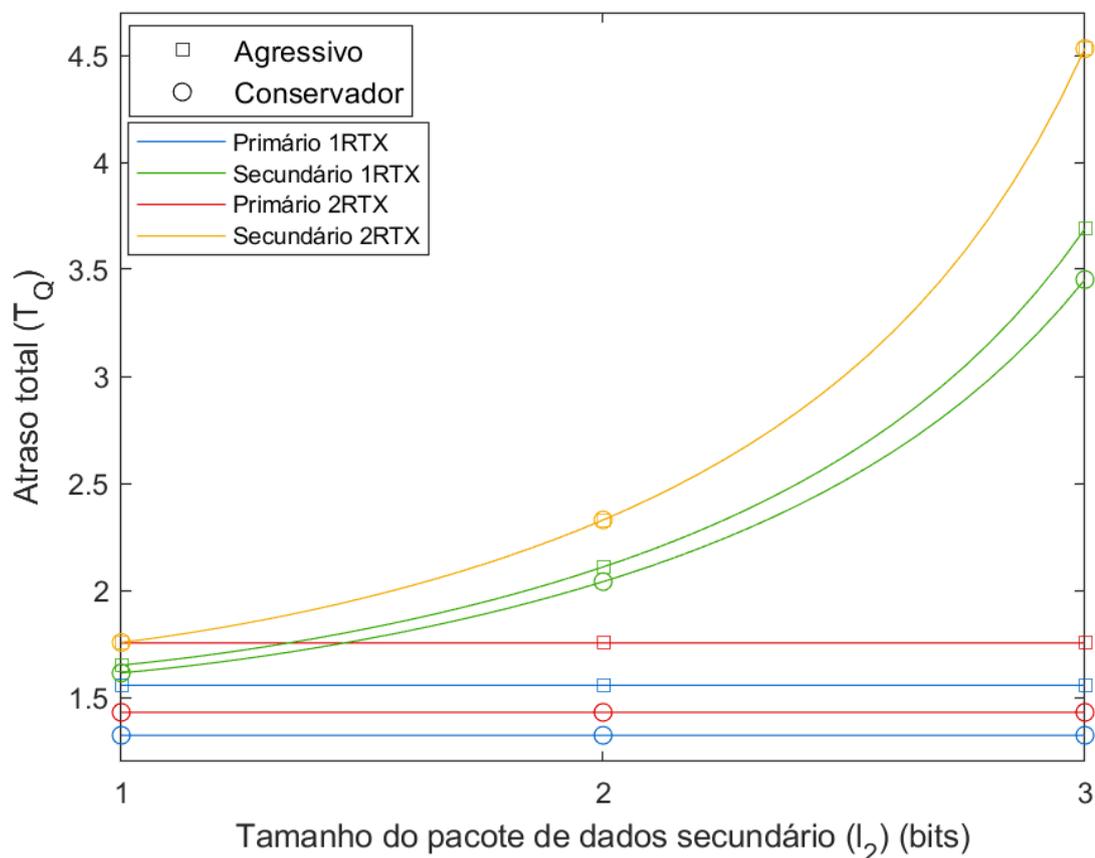


Figura 27 – Atraso total vs. l_2 para duas retransmissões primárias

Da mesma forma que anteriormente, o aumento do tamanho do pacote de dados secundário (l_2) resulta em um maior tempo necessário para a transmissão do mesmo pacote, além de também crescer o tempo de serviço, o tempo de fila e a ocupação do canal. Conseqüentemente, quanto maior o pacote, pior será o atraso secundário.

As transmissões primárias permanecem indiferentes pois não são influenciadas pelo pacote de dados secundário. O atraso permanece constante neste caso, porém maior que no caso de apenas uma retransmissão.

Adicionando-se uma retransmissão primária resulta novamente em um maior atraso em relação ao mesmo tamanho de pacote.

O próximo cenário aborda a influência da eficiência espectral do usuário primário (R_p). A Figura 28 a seguir mostra a variação do atraso, enquanto que a Figura 29 apresenta o que acontece com as probabilidades das regiões de operação.

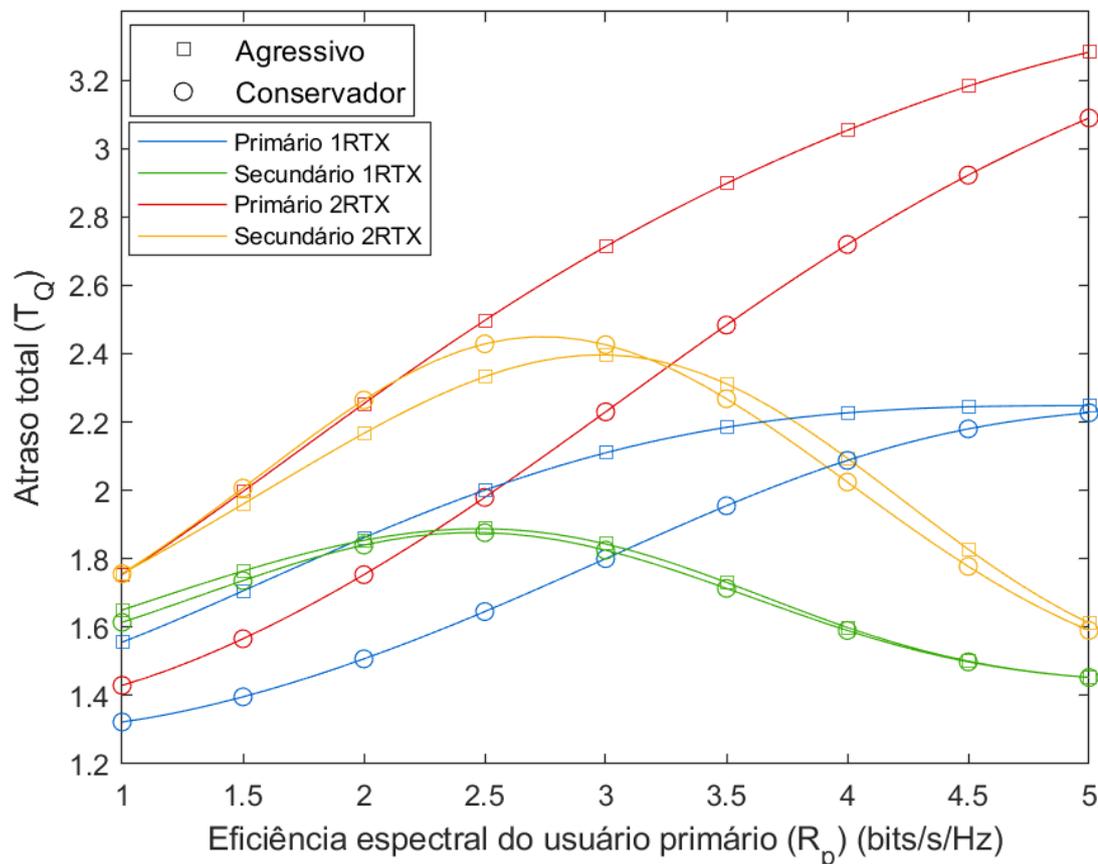


Figura 28 – Atraso total vs. R_p para duas retransmissões primárias

Primeiramente, percebe-se que a forma das curvas para uma ou duas retransmissões primárias são bem semelhantes. Assim como anteriormente, tem-se a impressão de que aumentar a eficiência espectral significaria uma transmissão mais rápida dos pacotes de dados primários e, por consequência, um menor atraso. No entanto, o que realmente acontece é um aumento considerável na probabilidade de *outage* primária ($P\{S_{10}\}$), revelando que poucos pacotes são efetivamente transmitidos. Resulta-se, portanto, em um aumento do atraso normalizado.

Novamente, o usuário secundário apresenta um resultado curioso. Com o aumento de R_p , o atraso tende a aumentar, visto a escassez de melhores oportunidades

de transmissão, como as regiões de operação S_1 , S_2 , S_3 , S_4 e S_6 . No entanto, a partir de certo ponto, a probabilidade de *outage* primária ($P\{S_{10}\}$) fica tão significativa que o usuário secundário transmite praticamente sozinho, possibilitando uma redução no atraso normalizado.

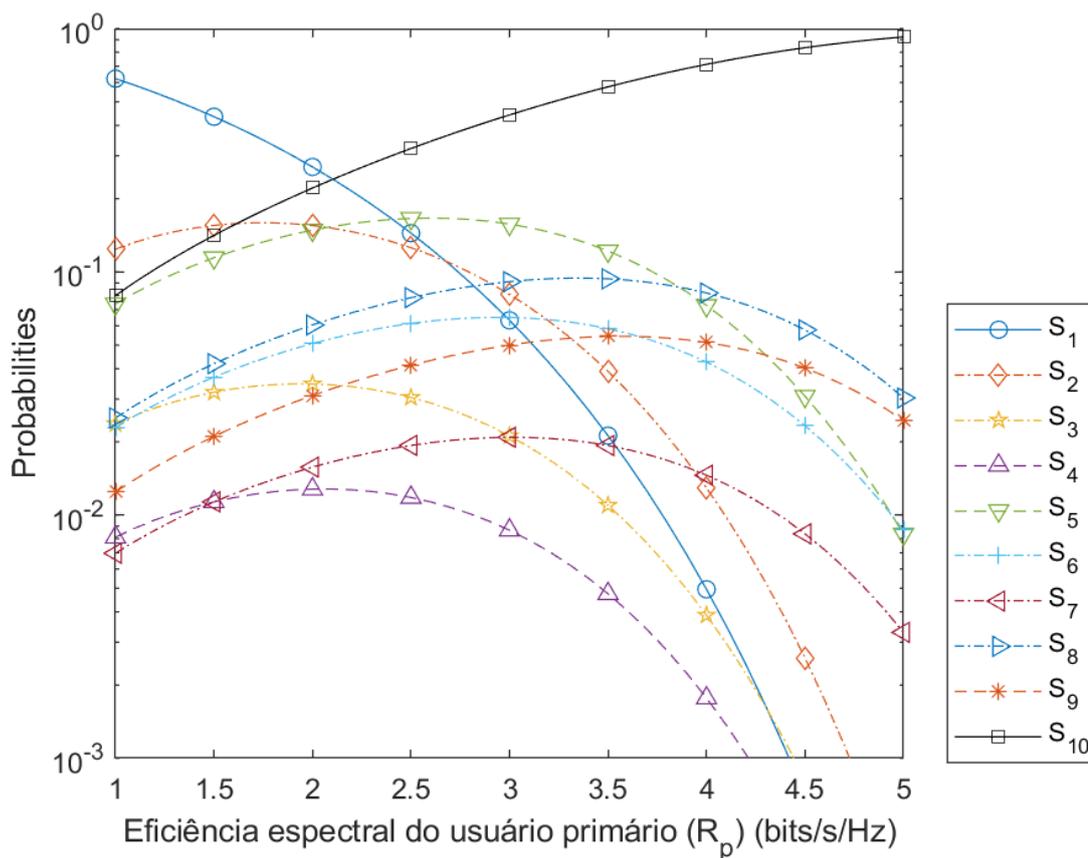


Figura 29 – Probabilidade vs. R_p para duas retransmissões primárias

Por último, a Figura 30 apresenta a evolução do atraso de acordo com a potência de transmissão primária (P_p). Para complementar a visualização, a Figura 31 mostra as probabilidades das regiões de operação.

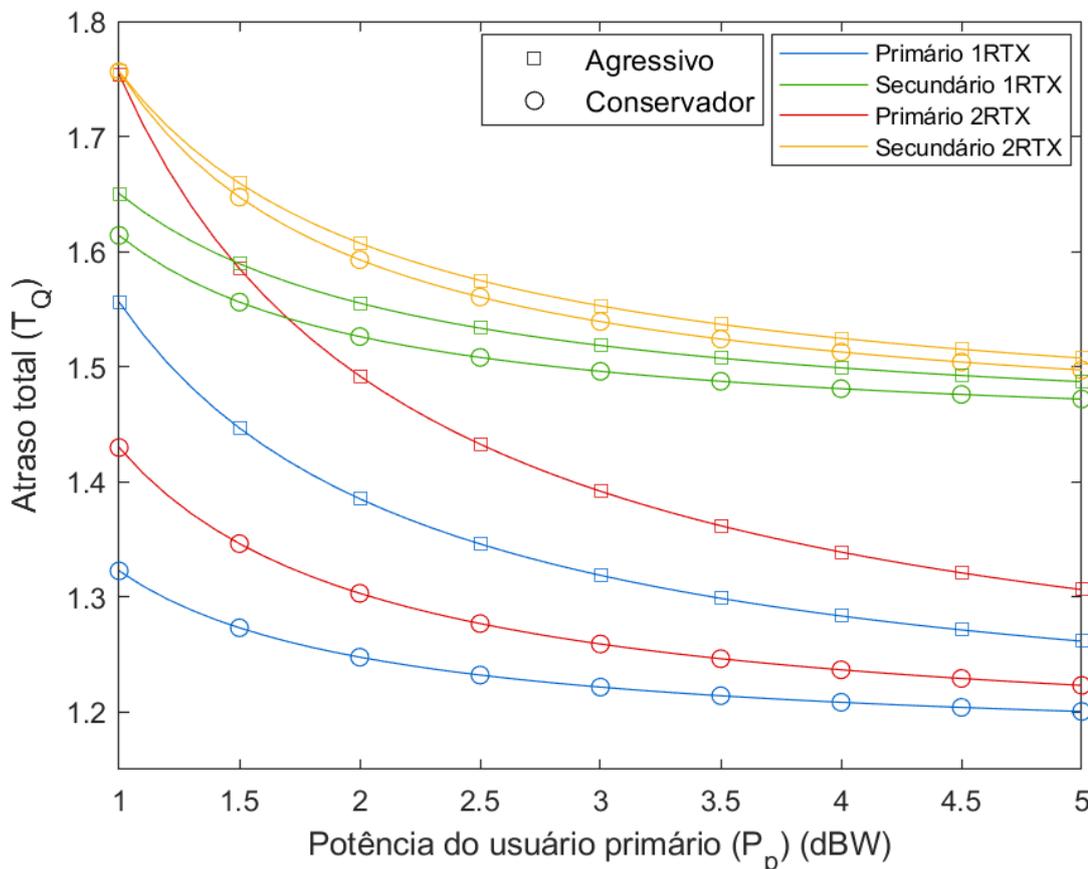


Figura 30 – Atraso total vs. P_p para duas retransmissões primárias

De forma geral, o aumento da potência de transmissão do usuário primário diminui o atraso tanto do usuário primário, quanto do usuário secundário, visto que melhora as condições de transmissão dos pacotes. Percebe-se que a partir de determinado valor de P_p , o atraso tende a estabilizar-se.

Neste cenário, a região de operação S_1 (melhor condição possível para ambos os usuários) prevalece e é diretamente beneficiada com o aumento de P_p , como observado na Figura 31.

A retransmissão adicional aumenta o atraso como esperado, porém mantém inalterado o comportamento anterior.

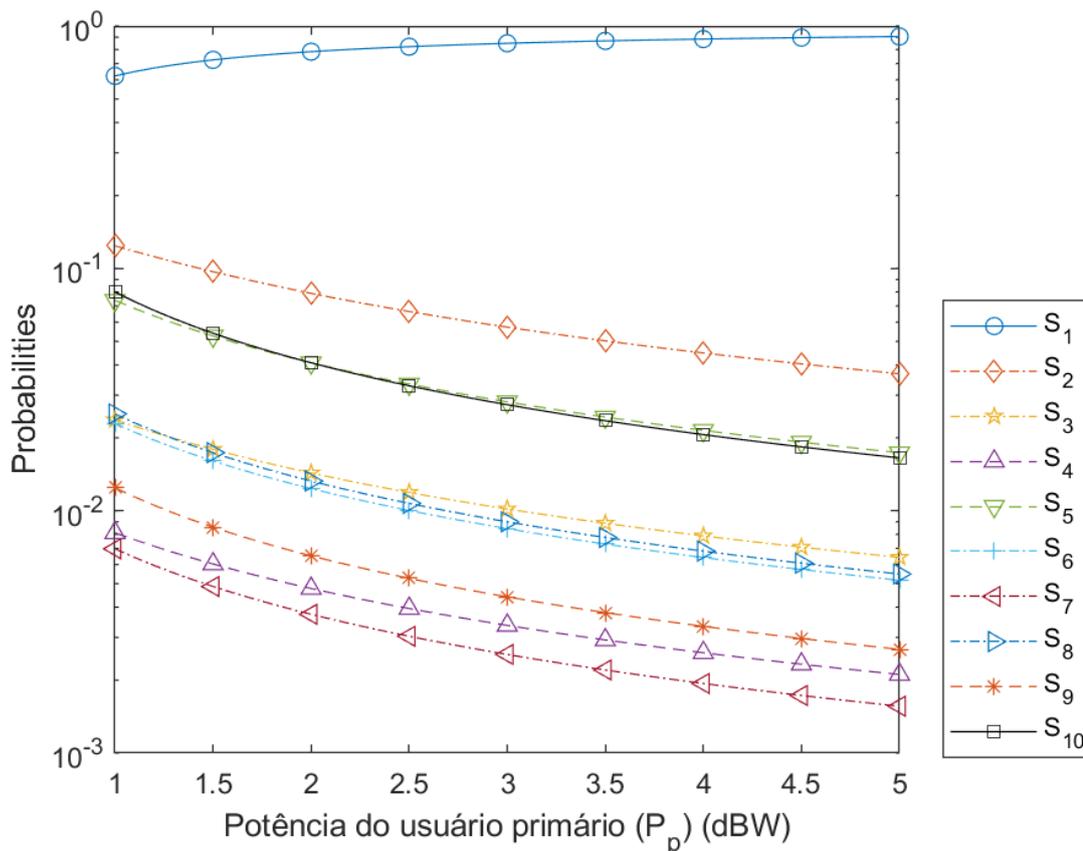


Figura 31 – Probabilidade vs. P_p para duas retransmissões primárias

5.9 Conclusão

Neste capítulo foi analisado o atraso para o caso de duas retransmissões primárias. Foi considerado o mesmo sistema apresentado na Seção 3.1.

Nota-se que à medida que mais retransmissões primárias são permitidas no sistema, o atraso tende a crescer proporcionalmente. Em todos os casos estudados, o atraso aumentou de forma sistemática, com maior inclinação nas curvas.

O principal fator analisado neste capítulo foi a influência do número de retransmissões no atraso total do sistema. Conclui-se que o atraso é diretamente proporcional ao número de retransmissões permitido, sendo necessário levar em conta ao projetar um sistema. No entanto, comparando-se as curvas do atraso em todos os cenários analisados para uma e duas retransmissões primárias, percebe-se que foram similares, sugerindo uma generalização para o comportamento do atraso.

6 CONCLUSÃO

Nesta dissertação, analisou-se uma extensão para a técnica de rádio cognitivo intitulada SHARP (*Spectrum Harvesting with ARQ Retransmission and Probing in Cognitive Radio*), considerando a possibilidade de um maior número de retransmissões do que o proposto nas análises originais [15]. Além disso, estudou-se o atraso como novo parâmetro de desempenho do sistema.

O método SHARP original foi apresentado, incluindo o modelamento do sistema, as regiões de operação e o cálculo de suas probabilidades, os modos de operação, o algoritmo e fluxograma de detecção do canal, bem como o *throughput* dos usuários primários e secundários. Gráficos foram replicados para ilustrar os resultados numéricos obtidos.

Em seguida, um maior número de retransmissões foi adicionado ao sistema de forma a analisar os possíveis efeitos em termos de *throughput* dos usuários primários e secundários. O mesmo modelo foi utilizado. Novas regiões de operação foram encontradas com suas respectivas probabilidades. O algoritmo de detecção de canal permaneceu o mesmo, porém o fluxograma aumentou de complexidade devido ao maior número de possibilidades de transmissão. O *throughput* final foi calculado.

Ao comparar o modelo SHARP com uma e duas retransmissões percebe-se que o número de regiões de operação cresce significativamente com o aumento do número de retransmissões primárias possíveis, como ilustrado nos fluxogramas apresentados. Resultados numéricos mostram que, para o SHARP agressivo, o maior número de retransmissões em situações com menor interferência secundária resulta em um aumento no *throughput* primário, situação que se altera à medida que a interferência cresce. Já o usuário secundário beneficia-se com mais retransmissões para o modo agressivo. Para o SHARP conservador, mais retransmissões primárias resultam em uma melhora no *throughput* efetivo primário em detrimento do *throughput* secundário.

O atraso foi estudado como novo parâmetro de desempenho para o método SHARP original com apenas uma retransmissão primária. Foram considerados diferentes cenários ao analisar o impacto nas transmissões, como a interferência do

usuário secundário, o tamanho dos pacotes de dados, a utilização do canal, a eficiência espectral do usuário primário e a potência de transmissão primária.

Todas as variáveis estudadas para o atraso afetaram de forma negativa o desempenho do sistema. Aumentar a potência de transmissão do usuário secundário (P_s) reduz o atraso em suas transmissões, porém causa maior interferência ao usuário primário e, por conseguinte, maior atraso. O tamanho do pacote de dados ($l_{1,2}$) e a utilização do canal ($\lambda_{1,2}$) influenciam diretamente nas transmissões, impactando também na latência do sistema. Aumentar a eficiência espectral primária (R_p) intuitivamente reduziria o atraso primário, visto que significa uma transmissão mais rápida dos pacotes de dados. No entanto, a probabilidade de *outage* primária ($P\{S_6\}$) sobe consideravelmente, resultando em poucos pacotes efetivamente transmitidos e um aumento do atraso primário normalizado. Este mesmo cenário ocorre de forma mais dinâmica para o usuário secundário, o qual possui oportunidades de transmissão mais escassas até que começa a utilizar o canal praticamente sozinho devido à alta probabilidade de *outage* primário, resultando em uma curva semelhante a uma parábola invertida. Por fim, o aumento da potência do usuário primário (P_p) acaba melhorando o atraso por permitir melhores condições de operação do sistema.

Permitir duas retransmissões primárias impactou negativamente no atraso, o qual tende a crescer de forma direta. Em todos os casos estudados, o atraso aumentou de forma sistemática, com maior inclinação das curvas nos gráficos. No entanto, comparando-se as curvas do atraso em todos os cenários analisados para uma e duas retransmissões primárias, percebe-se que foram bem similares, sugerindo uma possível generalização para o comportamento do atraso.

Em suma, estender o modelo SHARP [15] para duas retransmissões primárias aumenta consideravelmente a complexidade da análise do sistema devido ao surgimento de mais regiões de operação e a possibilidade de mais interações. O *throughput* primário beneficia-se em cenários de menor interferência, porém à medida em que as condições do canal pioram, mais retransmissões passam a ser maléficas para o sistema de forma geral, principalmente no modo agressivo. O atraso foi impactado negativamente com mais retransmissões primárias em todos os aspectos analisados.

Futuros trabalhos podem dedicar-se à simulação do sistema para validar o comportamento apresentado nos gráficos.

A análise do SHARP consiste basicamente em modelar os possíveis cenários de transmissão para o usuário primário e como o usuário secundário pode ocupar o mesmo canal simultaneamente, otimizando o uso dos recursos disponíveis. A análise realizada nesta dissertação permite apontar um possível comportamento generalizado desta técnica em relação ao *throughput* e atraso dos usuários primário e secundário, traçando um norte para simulações de projetos que visam utilizar este método de rádio cognitivo em telecomunicações.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HAYKIN, S. “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, v. 23, pages 201-2020, 2005.
- [2] MU, H., LIU, J., EWING, R., LI, J.; Human Indoor Positioning via Passive Spectrum Monitoring. 2021 55th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). IEEE, pages 1-6, 2021.
- [3] WANG, B., LIU, K. R.; Advances in Cognitive Radio Networks: a Survey, IEEE Journal of selected topics in signal processing, v. 5, n. 1, pages 5-23, 2010.
- [4] WANG, J., GHOSH, M., CHALLAPALI, K.; Emerging Cognitive Radio Applications: a Survey, IEEE Communications Magazine, v. 49, n. 3, pages 74-81, 2011.
- [5] LÓPEZ-BENÍTEZ, M.; Overview of Recent Applications of Cognitive Radio in Wireless Communication Systems. Handbook of Cognitive Radio. Springer, Singapore, 2018.
- [6] FELKER, N.; Applications in Cognitive Radios, 2016.
- [7] ZHAO, Q., SADLER, B. M.; A Survey of Dynamic Spectrum Access. IEEE Signal Process Magazine, v. 24, n. 3, pages 79-89, 2007.
- [8] YUCEK, T., ARSLAN, H.; A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications. IEEE communications surveys & tutorials, v. 11, n. 1, pages 116-130, 2009.

- [9] CHANDWANI, N., JAIN, A., VYAVA, P. D.; Throughput Comparison for Cognitive Radio Network Under Various Conditions of Primary User and Channel Noise Signals. 2015 Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO), IEEE, pages 1-2, 2015.
- [10] PARK, C. H., KIM, S. W., LIM, S. M., SONG, M. S.; HMM Based Channel Status Predictor for Cognitive Radio. 2007 Asia-Pacific Microwave Conference, IEEE, pages 1-4, 2007.
- [11] BARNAWI, A.; A Novel Approach for Cognitive Radio Sensing Using Wideband Chirp Signal. IEEE International Microwave Workshop Series on RF Front-ends for Software Defined and Cognitive Radio Solutions (IMWS), IEEE, pages 1-4, 2010.
- [12] ZAREEI, M., VARGAS-ROSALES, C. HERNANDEZ, R. V., AZPILICUETA E.; Efficient Transmission Power Control for Energy-harvesting Cognitive Radio Sensor Network. 2019 IEEE 30th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops), IEEE, pages 1-5, 2019.
- [13] KHAN, M. W., ZEESHAN, M., USMAN, M.; Traffic scheduling optimization in cognitive radio based smart grid network using mini-batch gradient descent method. 2019 14th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). IEEE, pages 1-5, 2019.
- [14] HATTAB, G., IBNKAHLA, M.; Multiband Spectrum Access: Great Promises for Future Cognitive Radio. Proceedings of the IEEE, v. 102, n. 3, pages 282-306, 2014.
- [15] LI, J. C. F., ZHANG, W., NOSRATINIA, A., YUAN, J.; SHARP: Spectrum Harvesting with ARQ Retransmission and Probing in Cognitive Radio. IEEE Transactions on Communications, v. 61, n. 3, pages 951-960, 2013.

- [16] ROY, S., FORTIER, P.; Maximal-ratio combining architectures and performance with channel estimation based on a training sequence. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 3, n. 4, pages 1154-1164, 2004.
- [17] SHORTLE, J. F., THOMPSON, J. M., GROSS, D., HARRIS, C. M.; *Fundamentals of queueing theory*. John Wiley & Sons, v. 399, 2018.
- [18] SPIEGEL, M. R., LIPSCHUTZ, S., LIU, J.; *Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas*. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.