

Inatel

Um Modelo Markoviano para Análise de
Desempenho de Redes Multi-Hop Full Duplex
com Interferência

Georgino da Silva Baltazar

Maio/2023

**Modelo Markoviano para Análise de
Desempenho de Redes Multi-Hop Full Duplex
com Interferência**

Georgino da Silva Baltazar

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

**ORIENTADOR: Prof. Dr. José Marcos
Câmara Brito**

Santa Rita do Sapucaí – MG

2023

Baltazar, Georgino da Silva

B197u

Um Modelo Markoviano para Análise de Desempenho de Redes Multi-Hop Full Duplex com Interferência. / Georgino da Silva Baltazar, Santa Rita do Sapucaí, 2023.

119 p.

Orientador: Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

1. 6G 2. 5G 3. Comunicação Full Duplex 4. SNR 5. Análise de Desempenho 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 16 / 05 / 2023,

pela comissão julgadora:

Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito - Inatel

Prof. Dr. Paulo Cardieri - Unicamp

Prof. Dr. António Marcos Alberti - Inatel

Coordenador do Curso de Mestrado

Prof. Dr. José Marcos Câmara



Instituto Nacional de Telecomunicações

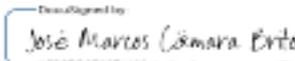
ATA Nº 235: DEFESA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TELECOMUNICAÇÕES – ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA ELÉTRICA

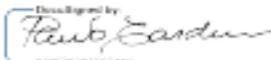
Autor: Georgino da Silva Baltazar

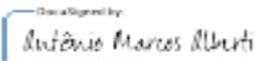
No dia 16 de maio de 2023, às 14h, remotamente via Plataforma Teams, realizou-se a defesa de dissertação de mestrado em Telecomunicações, cuja área de concentração é Engenharia Elétrica, do Engenheiro Georgino da Silva Baltazar, intitulada “Um Modelo Markoviano para Análise de Desempenho de Redes Multi-Hop Full Duplex com Interferência”. A banca julgadora foi composta por: Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito – Inatel, presidente, Prof. Dr. Paulo Cardieri da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp e Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti – Inatel. A defesa foi pública com a participação de pessoas interessadas. O presidente deu início aos trabalhos, anunciando ser esta a ducentésima trigésima primeira defesa de dissertação do Curso de Mestrado em Telecomunicações do Inatel. Solicitou ao mestrando proceder a sua defesa, o que foi feito no tempo regulamentar. Em seguida, os membros da banca examinadora fizeram perguntas, solicitaram esclarecimentos e teceram comentários sobre o trabalho desenvolvido. Terminada a fase de arguição e debates, os membros da banca iniciaram a sessão de julgamento para a deliberação quanto ao resultado da defesa:

- (X) Aprovada sem restrições, mas condicionada às eventuais revisões indicadas pelos membros da banca examinadora
- () Aprovada com restrições e condicionada às revisões indicadas pelos membros da banca examinadora
- () Reprovada

O presidente anunciou o resultado e eu Gisele Moreira dos Santos, secretária do Curso de Mestrado em Telecomunicações, lavrei a presente ata que, aprovada, foi assinada pelos membros da banca examinadora. Santa Rita do Sapucaí, 16 de maio de 2023.


Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito


Prof. Dr. Paulo Cardieri


Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti

*“Tendo por certo isto mesmo, que aquele que em vós
começou a boa obra a aperfeiçoará até ao dia de Jesus
Cristo ”.*

Filipenses 1:6

Dedicatória

Aos meus pais João Manuel Baltazar e Felisbina Gonçalves Silva Baltazar que incansavelmente me ensinaram o caminho da verdade, e investem cada dia na minha vida para que eu me torne uma pessoa sábia, responsável, e capacitado com bons hábitos morais para ser útil na sociedade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus Pai todo Poderoso por sua graça abundante na minha vida sem a qual não chegaria até este nível.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito por toda dedicação, paciência e a preciosa orientação. Que Deus continue lhe abençoando poderosamente e lhe dê mais sabedoria.

Agradeço ao Ministério das Telecomunicações do meu País (Angola), por ter me proporcionado a bolsa de estudos para que fizesse esta formação.

Aos meus pais João Manuel Baltazar e Felisbina Gonçalves Silva Baltazar pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida, por todo grande amor carinho e confiança que sempre depositaram em mim. A toda minha família Baltazar, o meu mui obrigado por toda força que têm me dado, e principalmente pelas vossas orações.

Em especial gostaria de agradecer a minha esposa Gabrielle Macedo Mendonça Baltazar por todo amor e carinho e por ter me suportado durante essa caminhada e não ter permitido que eu desistisse dessa dela.

A família que encontrei em Santa Rita do Sapucaí, em particular a Elvira Diogo, Sheila Cássia, o Mauro Cruz, Daniel Quiteque, Danniell Mulado, Vignon Fidele Adanvo e Miguel Francisco que sempre me ajudaram com prontidão nos momentos mais difíceis dessa longa caminhada, que Deus continue lhes abençoando.

A todos amigos e colegas do mestrado pela troca de conhecimento, experiências e companheirismo.

A Sra. Gisele dos Santos, por toda atenção e apoio que sempre me deu, pelo excelente trabalho que tem feito.

A todo corpo docente do Inatel que está sempre pronto a nos atender.

A CAPES pelo apoio financeiro recebido no semestre final do mestrado.

Ao meu Pastor Flávio Barbosa e toda sua família assim como os irmãos em Cristo da Igreja Santificação e Paz meus sinceros agradecimentos.

Conteúdo

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS e SIGLAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO.....	xii
Palavras-chave:.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
Keywords:.....	xiii
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2 COMUNICAÇÃO FULL DUPLEX.....	2
1.2.1 TRANSMISSÃO FD BIDIRECIONAL.....	3
1.2.2 TRANSMISSÃO FD BASEADA NO DESTINO.....	3
1.2.3 TRANSMISSÃO FD BASEADA NA ORIGEM.....	4
1.3 APLICAÇÕES DO FULL DUPLEX.....	4
1.4 DESAFIOS RELACIONADOS AO FULL DUPLEX.....	6
1.5 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	7
1.6 PUBLICAÇÕES.....	8
1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	8
2.1 REDES MULTI-HOP.....	9
2.2 CENÁRIO E PRESSUPOSTOS DA REDE UTILIZADA NAS ANÁLISES.....	10
2.3 MODOS DE OPERAÇÃO DA REDE.....	11
2.3.1 MODO A [FULL, OMNI].....	12
2.3.2 MODO B [HALF, DIREC].....	13
2.3.3 MODO C [FULL, DIREC].....	14
2.4 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO.....	15

CAPÍTULO 3: ANÁLISE DE DESEMPENHO DA REDE SEM FIO MULTI-HOP FULL DUPLEX CONSIDERANDO A INTERFERÊNCIA, MODELO SEM BUFFER	16
3.1 ANÁLISE DA CADEIA DE MARKOV DE TEMPO CONTÍNUO	16
3.2 MODELO SEM BUFFER	17
3.2.1 MODO A [FULL, OMNI]	18
3.2.2 MODO B [HALF, DIREC]	22
3.2.3 MODO C [FULL, DIREC]	25
3.3 MATRIZ DE TRANSIÇÃO E PROBABLIDADE EM REGIME ESTACIONÁRIO	29
3.4 MÉTRICAS DE DESEMPENHO PARA O MODELO SEM BUFFER	30
a) PROBABILIDADE DE BLOQUEIO	34
b) CAPACIDADE	37
c) PROBABILIDADE DE DESCARTE	40
d) VAZÃO	43
e) NUMÉRO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA	46
3.5 CONCLUSÃO PARCIAL DO CAPÍTULO	48
CAPÍTULO 4: MODELO COM BUFFER	50
4.1 MODO A[FULL, OMNI]	50
4.1.1 DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS.....	50
4.2 MODO B[HALF, DIREC].....	55
4.2.1 DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS.....	55
4.3 MODO C[FULL, DIREC]	58
4.3.1 DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS.....	58
4.4 DIAGRAMAS DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS COM <i>BUFFER</i> = 1	62
4.4.1 MODO A[FULL,OMNI]	63
4.4.2 MODO A[HALF,DIREC].....	64
4.4.3 MODO C[FULL,DIREC]	65
4.5 MÉTRICAS DE DESEMPENHO PARA O MODELO COM BUFFER	66

a) PROBABILIDADE DE BLOQUEIO	66
b) CAPACIDADE	69
c) PROBABILIDADE DE DESCARTE	73
d) VAZÃO	76
a) NUMÉRO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA	79
4.6 CONCLUSÃO PARCIAL DO MODELO COM BUFFER	81
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS ...	83
5.1 CONCLUSÕES	83
5.2 PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS	84
REFERÊNCIAS	85
Anexo A	89
<i>Modelo sem Buffer</i>	89
<i>Modelo com Buffer</i>	95

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: TRANSMISSÃO BIDIRECIONAL FULL DUPLEX.....	3
FIGURA 1.2: TRANSMISSÃO BASEADA NO DESTINO.....	4
FIGURA 1.3: TRANSMISSÃO BASEADA NA ORIGEM.....	4
FIGURA 1.4: TOPOLOGIAS COM FULL DUPLEX	5
FIGURA 2.1: CENÁRIO DA REDE (REDE SEM FIO <i>MULTI-HOP</i>).....	10
FIGURA 2.2: MODO DE OPERAÇÃO A [FULL, OMNI].....	13
FIGURA 2.3: MODO DE OPERAÇÃO B [HALF, DIREC].	14
FIGURA 2.4: MODO DE OPERAÇÃO C [FULL, DIREC].....	15
FIGURA 3.1: MODO DE OPERAÇÃO A [FULL, OMNI] DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS SEM BUFFER. .	21
FIGURA 3.2: MODO DE OPERAÇÃO B [HALF, DIREC] DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS SEM BUFFER. .	24
FIGURA 3.3: <i>MODO DE OPERAÇÃO C [FULL, DIREC] DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS SEM BUFFER.</i>	28
FIGURA 3.4: CENÁRIO C.	32
FIGURA 3.5: PROBABILIDADE DE BLOQUEIO.....	35
FIGURA 3.6: PROBABILIDADE DE BLOQUEIO COM SNR=10.....	36
FIGURA 3.7: PROBABILIDADE DE BLOQUEIO COM SNR=50.....	36
FIGURA 3.8: PROBABILIDADE DE BLOQUEIO COM SNR = 100.	37
FIGURA 3.9: CAPACIDADE DO SISTEMA.	38
FIGURA 3.10: CAPACIDADE DO SISTEMA COM SNR = 10.	39
FIGURA 3.11: CAPACIDADE DO SISTEMA COM SNR = 50.	39
FIGURA 3.12: CAPACIDADE DO SISTEMA COM SNR = 100.	40
FIGURA 3.13: PROBABILIDADE DE DESCARTE.	41
FIGURA 3.14: PROBABILIDADE DE DESCARTE COM SNR = 10.....	42
FIGURA 3.15: PROBABILIDADE DE DESCARTE COM SNR = 50.....	42
FIGURA 3.16: PROBABILIDADE DE DESCARTE COM SNR = 100.....	43
FIGURA 3.17: VAZÃO.	44
FIGURA 3.18: VAZÃO COM SNR = 10.	44
FIGURA 3.19: VAZÃO COM SNR = 50.	45
FIGURA 3.20: VAZÃO COM SNR = 100.	45
FIGURA 3.21: NÚMERO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA.....	46
FIGURA 3.22: NÚMERO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA COM SNR = 10.....	47
FIGURA 3.23: NÚMERO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA COM SNR = 50.....	47
FIGURA 3.24: NÚMERO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA COM SNR = 100.....	48
FIGURA 4.1: DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS MODO A[FULL,OMNI] COM <i>BUFFER</i> = 1.	63
FIGURA 4.2: DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS MODO B[HALF, DIREC] COM <i>BUFFER</i> = 1.	64
FIGURA 4.3: DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS MODO C[HALF, DIREC] COM <i>BUFFER</i> = 1.	65
FIGURA 4.4: PROBABILIDADE DE BLOQUEIO MODO A[FULL,OMNI].	67
FIGURA 4.5: PROBABILIDADE DE BLOQUEIO MODO B[HALF,DIREC].	68
FIGURA 4.6: PROBABILIDADE DE BLOQUEIO MODO C[FULL,DIREC].	68
FIGURA 4.7: PROBABILIDADE DE BLOQUEIO COM <i>BUFFER</i> = 10 E SNR = 100.....	69
FIGURA 4.8: CAPACIDADE DO SISTEMA MODO A[FULL,OMNI].....	71
FIGURA 4.9: CAPACIDADE DO SISTEMA MODO B[HALF,DIREC].....	71
FIGURA 4.10: CAPACIDADE DO SISTEMA MODO C[FULL,DIREC].	72
FIGURA 4.11: CAPACIDADE DO SISTEMA COM <i>BUFFER</i> = 10 E SNR1=100.....	72
FIGURA 4.12: PROBABILIDADE DE DESCARTE MODO A[FULL,OMNI].....	74
FIGURA 4.13: PROBABILIDADE DE DESCARTE MODO B[HALF,DIREC].	74
FIGURA 4.14: PROBABILIDADE DE DESCARTE MODO C[FULL,DIREC].	75
FIGURA 4.15: PROBABILIDADE DE DESCARTE COM <i>BUFFER</i> = 10 E SNR1=100.....	75
FIGURA 4.16: VAZÃO MODO A[FULL,OMNI].	77

FIGURA 4.17: VAZÃO MODO B[HALF,DIREC].	77
FIGURA 4.18: VAZÃO MODO C[FULL,DIREC].	78
FIGURA 4.19: VAZÃO COM BUFFER = 10 E SNR1=100.	78
FIGURA 4.20: NÚMERO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA MODO A[FULL,OMNI].	79
FIGURA 4.21: NÚMERO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA MODO B[HALF,DIREC].	80
FIGURA 4.22: NÚMERO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA MODO C[FULL,DIREC].	80
FIGURA 4.23: NÚMERO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA COM BUFFER = 10 E SNR1=100.	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – <i>MODO A[FULL, OMNI] EQUAÇÕES DE TRANSIÇÕES SEM BUFFER</i>	21
TABELA 3.2 – <i>MODO B[HALF, DIREC] EQUAÇÕES DE TRANSIÇÕES SEM BUFFER</i>	25
TABELA 3.3 – <i>MODO C[FULL, DIREC] EQUAÇÕES DE TRANSIÇÕES SEM BUFFER</i>	28

LISTA DE ABREVIATURAS e SIGLAS

4G – Quarta Geração de redes móveis.

5G – Quinta Geração de redes móveis.

6G – Sexta Geração de redes móveis.

eMBB – *Enhanced Mobile Broadband*.

IBFD – *In-Band Full Duplex*.

HD – *Half-Duplex*.

Iot – *Internet of things*.

SNR – *Signal-to-Noise Ratio*.

MAC – *Medium Access Control*.

MANETs – *Mobile Ad-Hoc Networks*.

mMTC – *Massive Machine Type Communication*.

SI – *Self – Interference*.

URLLC – *Ultra Reliable Low Latency Communication*.

VANETs – *Vehicular Ad-Hoc Networks*.

WMNs – *Wireless Mesh Networks*.

WSNs – *Wireless Sensor Networks*.

LISTA DE SÍMBOLOS

b – Representa o tamanho do buffer.

C – Capacidade do Sistema.

PD – Probabilidade de Descarte.

E_q – Número médio de elementos.

i – Representa a existência ou não de uma transmissão do nó S para o nó 1.

j – Representa a existência ou não de uma transmissão do nó 1 para o nó 2.

k – Representa a existência ou não de uma transmissão do nó 2 para o nó D.

P – Probabilidade de Bloqueio.

P_s – Probabilidade de Sucesso.

Q – Matriz de transição

S – Conjunto de estados possíveis

SNR – Relação Sinal Ruído na ausência de interferência

SRN_n – Relação Sinal Ruído na presença de interferência

Th – Vazão.

w_i – Representa o número de pacotes em espera no nó S

w_j – Representa o número de pacotes em espera no nó 1

w_k – Representa o número de pacotes em espera no nó 2

λ – Taxa média de chegada de pacotes

μ – Taxa de serviço na ausência de interferência

μ_n – Taxa de serviço na presença de interferência

ϕ – Capacidade do canal de um determinado link

$\pi(x)$ – Probabilidade em Regime estacionário

RESUMO

As redes de comunicações sem fio de quinta geração (5G) já foram implantadas em diversas partes ao redor do mundo com objetivo de fornecer altas taxas de dados para o cenário eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*), um número massivo de dispositivos para o cenário mMTC (*Massive Machine Type Communication*) e atrasos muito reduzidos com altíssima confiabilidade para o cenário URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communication*). Contudo, um conjunto de novas aplicações está sendo vislumbrado, integrando os mundos físico, digital e biológico, cujos requisitos de desempenho vão além do que se pode alcançar com as redes 5G, demandando que uma nova geração comece a ser pesquisada e desenvolvida. Este processo de evolução tem ocorrido, desde a primeira geração das redes de comunicações móveis, há cada dez anos, aproximadamente. Ou seja, mais ou menos a cada dez anos surge uma nova geração de redes de comunicações móveis, o que projeta o início da implantação das redes 6G para o ano de 2030.

Dentre as técnicas promissoras para o 6G está a comunicação *full duplex*, tema desta dissertação, que é uma tecnologia que permite um dispositivo transmitir e receber no mesmo meio físico ao mesmo tempo. Nesta dissertação, propusemos um modelo Markoviano analítico para analisar o desempenho da tecnologia *full duplex* e *half duplex* combinada com antenas omnidirecionais e antenas direcionais numa rede sem fios *multi-hop* com tráfego em apenas um sentido levando em conta a interferência. Várias métricas de desempenho para avaliar o desempenho da rede foram consideradas: Probabilidade de Bloqueio, Capacidade, Probabilidade de Descarte, vazão e Número Médio Elementos no sistema. Com base nas análises obtidas, observamos que no modelo onde não existe *buffer* nos nós da rede e com uma SNR maior, a comunicação *half duplex* combinadas com antenas direcionais tem o melhor desempenho em termos de capacidade e vazão. No entanto, quando introduzimos *buffer* nos nós da rede, a tecnologia *full duplex* combinadas a antenas direcionais e com a SNR alta tem um desempenho muito superior à tecnologia *half duplex*.

Palavras-chave: 6G, 5G; Comunicação *Full Duplex*; SNR; Análise de Desempenho; Processos de Markov, antenas direcionais, antenas omnidirecionais, interferência.

ABSTRACT

Fifth generation (5G) wireless communication networks have already been deployed in many parts of the world aiming to provide high data rates for the eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*) scenario, a massive number of devices for the mMTC (*Massive Machine Type Communication*) scenario, and greatly reduced delays with very high reliability for the URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communication*) scenario. However, a number of new applications are being envisioned, integrating the physical, digital and biological worlds, whose performance requirements go beyond what can be achieved with 5G networks, demanding that a new generation begins to be researched and developed. Since the first generation of mobile communications networks, this process of evolution has taken place approximately every ten years. That is, more or less every ten years a new generation of mobile communications networks appears, which projects the start of deployment of 6G networks for the year 2030.

Among the promising techniques for 6G is full duplex communication, the subject of this dissertation, which is a technology that allows a device to transmit and receive on the same physical medium at the same time. In this dissertation, we proposed an analytical Markovian model to analyze the performance of full duplex and half duplex technology combined with omnidirectional antennas and directional antennas in a multi-hop wireless network with one-way traffic taking interference into account. Several performance metrics to evaluate network performance were considered: Block Probability, Capacity, Drop Probability, Throughput, and Average Number of Elements in the system. Based on the analyses obtained, we observe that in the model where there is no buffer at the network nodes and with a higher SNR, half duplex communication combined with directional antennas has the best performance in terms of capacity and throughput. However, when we introduce buffering at the network nodes, full duplex technology combined with directional antennas and with high SNR performs much better than half duplex technology.

Keywords: 6G, 5G; Full Duplex communication; SNR; Performance Analysis; Markov Processes, directional antennas, omnidirectional antennas, interference.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As redes de comunicações sem fio de quinta geração (5G) já foram implantadas em diversas partes ao redor do mundo com objetivo de fornecer altas taxas de dados para o cenário eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*), um número massivo de dispositivos para o cenário mMTC (*Massive Machine Type Communication*) e atrasos muito reduzidos com altíssima confiabilidade para o cenário URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communication*). Contudo, um conjunto de novas aplicações está sendo vislumbrado, integrando os mundos físico, digital e biológico, cujos requisitos de desempenho vão além do que se pode alcançar com as redes 5G, demandando que uma nova geração comece a ser pesquisada e desenvolvida. Este processo de evolução tem ocorrido, desde a primeira geração das redes de comunicações móveis, há cada dez anos, aproximadamente. Ou seja, aproximadamente a cada dez anos surge uma nova geração de redes de comunicações móveis, o que projeta o início da implantação das redes 6G para o ano de 2030 [1][2].

A rede 6G é a evolução das gerações anteriores, rede de quarta geração (4G) e da rede de quinta geração (5G). Comparado ao o 5G, o 6G terá uma banda de frequência mais ampla, maior taxa de transmissão, eficiência de espectro, maior capacidade de conexão, menor atraso e maior cobertura [3]. As redes 6G estão sendo projetadas para melhorar a qualidade dos serviços e suportar elevadas demandas de tráfego [4]. Apesar do 5G ainda não ter sido totalmente explorado, diversos projetos de pesquisas e associações ao redor do mundo estão propondo novas aplicações e casos de usos para o 6G [5]-[9], essa nova geração tecnológica irá além da comunicação, integrando um conjunto de funcionalidades jamais vistas em nenhuma outra parte.

Dentre os requisitos esperados para o 6G, extraídos de [7], estão:

- ✓ Taxa de dados de pico de 100 Gbps.
- ✓ Sensibilidade de recepção do usuário menor que -130 dBm.
- ✓ Latência menor que 1ms.
- ✓ Eficiência espectral 3 vezes maior que a do 5G.
- ✓ Eficiência energética 10 vezes maior que a do 5G.
- ✓ Taxa de dados de experiência do usuário maior que 10 Gbps.

- ✓ Suporte à mobilidade com velocidades de até 1000 km/h.
- ✓ 10^7 dispositivos/km².

Para atingir os requisitos desafiadores impostos pelo 6G, diversas pesquisas ao redor do mundo têm sido feitas a fim de aperfeiçoar as tecnologias existentes e desenvolver novas técnicas de comunicações avançadas e inteligentes para tornar o 6G uma realidade concreta. Dentre essas novas técnicas promissoras para o 6G está a comunicação *full duplex*, objeto de estudo desta dissertação. Outras tecnologias que estão sendo consideradas promissoras para o 6G são: comunicações em THz e comunicação por luz visível, superfícies inteligentes reconfiguráveis, uso massivo de inteligência artificial, redes 3D, etc. [2][3][6].

Na próxima seção, descrevemos detalhadamente a comunicação *full duplex* em redes sem fio.

1.2 COMUNICAÇÃO FULL DUPLEX

A tecnologia de comunicação *in band full-duplex* (IBFD), ou simplesmente *full duplex*, é uma tecnologia que permite transmissão e recepção simultâneas de dados usando a mesma banda de frequência. A comunicação sem fio *full duplex* é um tema de pesquisa que continua ganhando força atualmente, embora as pesquisas para viabilizar as comunicações sem fio *full duplex* existam desde a década de 60, quando os estudos eram direcionados para transmissões bidirecionais em radares [10]. A comunicação IBFD pode teoricamente dobrar a eficiência espectral da camada física, ajudando a otimizar o compartilhamento de recursos e também a atender os requisitos de alta eficiência espectral. No entanto, esses benefícios são limitados pela interferência interna do nó causada pelo seu próprio transmissor ao seu receptor, a chamada auto interferência. Além do mais, há um aumento intrínseco da interferência na rede devido às transmissões simultâneas [10][11]. Então, podemos dizer que a comunicação *full duplex* que envolve transmissão e recepção simultâneas na mesma banda de frequência não funciona usando as técnicas convencionais de camada física devido a presença da auto interferência descrita anteriormente. Para que a comunicação *full duplex* seja possível no mundo real, cada nó deve ser capaz de eliminar uma quantidade suficiente da auto interferência e minorar a interferência entre os usuários, ou seja, os ganhos que a comunicação *full duplex* traz só são possíveis com a integração de diferentes técnicas de cancelamento da auto interferência associadas a protocolos de camada física e de

camada de acesso ao meio apropriados para cada cenário. Os avanços obtidos pelas pesquisas indicam que hoje a auto interferência pode ser reduzida a níveis aceitáveis [11]-[15]. Esses avanços tornam a tecnologia *full duplex* possível para futuras gerações de redes sem fio como as redes 6G, que já se encontra em fase de pesquisas e desenvolvimentos.

Em um sistema de redes sem fio, a transmissão *full duplex* pode ocorrer de três modos distintos:

- ✓ Modo de transmissão bidirecional.
- ✓ Modo de transmissão baseado no destino.
- ✓ Modo de Transmissão Baseado na origem.

Antes do início de uma transmissão, o modo escolhido é negociado entre os nós da rede [17]. Nas próximas subseções descrevemos cada um desses modos de transmissão.

1.2.1 TRANSMISSÃO FD BIDIRECIONAL

Neste modo de transmissão, os nós podem enviar dados um ao outro simultaneamente, as comunicações são feitas por apenas dois nós. A comunicação é bidirecional e pode ocorrer em ambas as direções ao mesmo tempo como ilustra a Figura 1.1. A primeira comunicação é nomeada como primeira transmissão e a segunda como segunda transmissão. O nó **A** atua como transmissor primário na primeira transmissão e receptor secundário na segunda transmissão. O transmissor primário é responsável por conseguir o acesso ao canal por meio de algum mecanismo de controle de acesso e inicia a primeira transmissão. Por outro lado, o nó **B** atua como receptor primário na primeira transmissão e transmissor secundário na segunda transmissão [17].



Figura 1.1: Transmissão Bidirecional Full Duplex

1.2.2 TRANSMISSÃO FD BASEADA NO DESTINO

A Figura 1.2 ilustra o funcionamento deste modo de transmissão, onde três nós participam das comunicações. O nó **A** atua como transmissor primário, pois inicia a primeira transmissão. O nó **R** atua como receptor primário, isso porque é o destino da transmissão do nó **A**. Estabelecida esta comunicação, o nó **R** inicia uma outra

comunicação com o nó **B**. Note que agora o nó **R** passa a ser transmissor secundário além de ser receptor primário; o nó **B** atua como receptor secundário. Sendo assim, o nó **R** se comunica com os nós **A** e **B**. Aqui somente o nó **R** utiliza a comunicação *full duplex*, pois ele pode transmitir e receber ao mesmo tempo [17].



Figura 1.2: Transmissão Baseada no Destino

1.2.3 TRANSMISSÃO FD BASEADA NA ORIGEM

Neste modo de transmissão, o nó **R** atua como transmissor primário, pois ele inicia a primeira transmissão, e o nó **A** atua como receptor primário, por ser o destino da primeira transmissão que sai do nó **R**. Estabelecida esta comunicação, então o nó **B** inicia outra comunicação e passa a ser o transmissor secundário. Este modo é nomeado de transmissão baseado na origem por causa do nó central **R** ser a origem da transmissão primária. Como no modo anterior, somente o nó **R** utiliza a comunicação *full duplex*, pois ele pode transmitir e receber ao mesmo tempo [17]. A Figura 1.3 ilustra o funcionamento deste modo.



Figura 1.3: Transmissão Baseada na Origem

1.3 APLICAÇÕES DO FULL DUPLEX

Com a tecnologia *full duplex*, diferentes aplicações são possíveis para reduzir o atraso nas comunicações e aumentar a eficiência espectral. No entanto, para apreciarmos os ganhos que esta tecnologia pode trazer, é instrutivo olharmos para três topologias básicas ilustradas na Figura 1.4: (a) topologia bidirecional, (b) topologia relé, e (c)

topologia estação base. Em cada topologia, os nós podem ter várias antenas, e o número de antenas por nós pode diferir.

A topologia (a) ilustra dois nós que se comunicam de forma simétrica, ou seja, o nó A envia dados para o nó B, que por sua vez envia dados em resposta para A. Essa resposta pode ser informações de controle para protocolos, um pacote com dados de uma aplicação ou sinalizações do canal. Nesta topologia, se pelo menos um nó for *half duplex*, a comunicação não pode ocorrer simultaneamente na mesma banda, tendo de ser feitas de forma alternada. Caso os dois nós sejam capazes de operar em *full duplex*, os pacotes podem ser enviados ao mesmo tempo e na mesma banda, duplicando assim a eficiência espectral em relação ao *half duplex*.

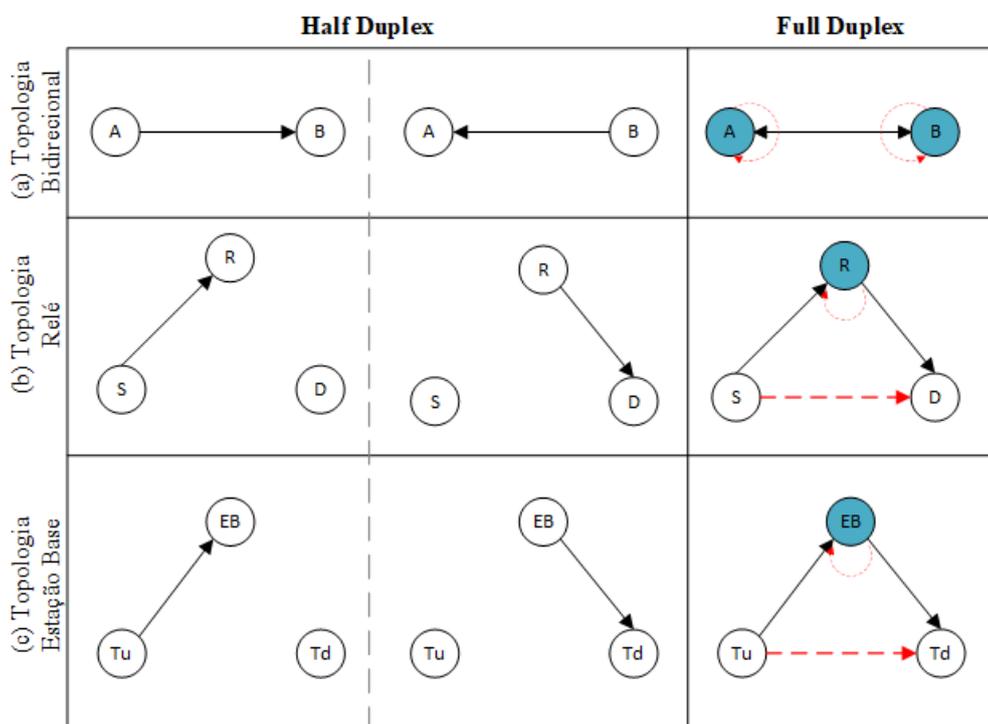


Figura 1.4: Topologias com *full duplex*

Por sua vez, na topologia relé, ilustrada na Figura 1.4 (b), pode-se observar que a comunicação do nó S para o nó D não ocorre diretamente, mas via o nó R, que opera como retransmissor (*relay*). Se a rede é *half duplex*, o nó R não é capaz de transmitir e receber dados ao mesmo tempo. Assim, cada transmissão deve ocorrer em momentos alternados. Todavia, caso o nó R seja capaz de operar no modo *full duplex*, os dados recebidos do nó S podem ser retransmitidos quase diretamente para o nó de destino D. Este tipo de operação reduz a latência drasticamente.

Finalmente, a topologia estação base, ilustrada na Figura 1.4 (c), é basicamente uma rede infraestruturada, onde a estação base (EB) é responsável pelos tráfegos de *upload* e *download* para os nós. Como na topologia anterior, para operação *half duplex*, somente um pacote pode ser enviado a cada instante. Ou seja, destinado para o nó Td ou para a estação base (EB), como pode-se observar na Figura 1.4 (c). Porém, se a estação base for capaz de operar no modo *full duplex*, os tráfegos nos dois sentidos podem ocorrer simultaneamente.

Vale lembrar que tanto no cenário com *relay*, como no cenário com estação radiobase, os nós de comunicação não precisam ser capazes de funcionarem em *full duplex*. No entanto, é necessário que os elementos intermediários da comunicação possam se comunicar bidireccionalmente para obter-se os benefícios da comunicação. Essa caracterização é benéfica, pois possibilita a implantação de dispositivos *full duplex* em ambientes realísticos sem a necessidade de substituir todos os ativos da rede. Ademais, os equipamentos com a tecnologia *full duplex* devem ser capazes de selecionar o modo de operação, pois dependendo de fatores, como por exemplo a interferência inter-terminal, a comunicação *full duplex* pode sair muito cara e também piorar o desempenho da rede. Podemos observar essa interferência nas topologias (b) e (c) da Figura 1.4; esse tipo de interferência ocorre quando a transmissão de um nó interfere na recepção de outro nó, em tráfegos diferentes [10][11][17].

1.4 DESAFIOS RELACIONADOS AO FULL DUPLEX

Como descrito na seção anterior, a comunicação *full duplex* permite que diferentes aplicações sejam possíveis para aumentar a eficiência espectral e reduzir o atraso nas comunicações. Porém, o funcionamento adequado desta tecnologia impõe alguns desafios nas camadas físicas e de acesso ao meio. Em [17], os autores descrevem alguns desses desafios como: a seleção oportunística dos diferentes modos *full duplex*, interferência ou colisão entre os nós, sincronização, justiça entre os nós *half duplex* e o tempo para estabelecimento de uma transmissão.

Novos modelos de rádios que apresentem não somente técnicas de cancelamento de auto interferência, mas também novas configurações de antenas são necessários para solucionar os problemas da camada PHY. Em [17][18][19], os autores apresentam alguns desses novos modelos. Em contrapartida, para a resolução dos problemas relacionados à camada MAC, são necessários novos protocolos de acesso ao meio para

regular as transmissões e garantir o máximo de eficiência possível da rede. Esses protocolos devem ser capazes de resolver os problemas existentes nas redes *half duplex*, como, por exemplo, terminais ocultos e interferência inter-terminal, e serem capazes de explorar as novas oportunidades de transmissão com o modo *full duplex*. Em [17], os autores apresentam vários desses protocolos, classificados de acordo com o modo de transmissão e também com o tipo de rede: redes de área local sem fio, rede celular, rede D2D, redes *multi-hop*, redes de retransmissão.

1.5 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Numerosas bibliografias têm abordado conceitos para avaliar o desempenho das redes sem fio *full duplex*. A avaliação do desempenho das redes sem fio *full duplex* é importante, pois nos permite definir a melhor configuração e modo de operação da rede. De modo abrangente, as avaliações de desempenho da comunicação *full duplex* é baseada em simulação, como, por exemplo, em: [21], onde os autores propuseram um protocolo MAC *full duplex* assimétrico; [26], onde os autores apresentam um protocolo MAC *full duplex* centralizado aplicado na comunicação dispositivo a dispositivo; [25][27], onde os autores apresentaram uma rede sem fio *multi-hop* em linha com tráfego em apenas um sentido. No entanto, diferente das referências citadas acima onde as análises de desempenho das soluções propostas são baseadas unicamente em simulação, em [31] os autores propuseram um modelo matemático de Cadeias de Markov de tempo contínuo multidimensionais para analisar o desempenho da tecnologia *full duplex* em uma rede sem fio *multi-hop* sem considerar o uso de buffer nos servidores; já em [34], os mesmos autores estenderam o modelo considerando o uso de *buffer* nos nós da rede. Todavia, estes modelos consideravam que a transmissão de um nó só poderia alcançar os seus vizinhos; ou seja, a transmissão de um nó poderia causar interferência apenas em seus vizinhos. Portanto, um modelo mais abrangente que considere a interferência entre nós não vizinhos é mais realista e pode levar a análises mais precisas e a uma melhor compreensão dos verdadeiros benefícios das redes *full duplex* e sua configuração ideal.

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver um modelo matemático que possibilite fazer análise de desempenho da tecnologia *full duplex* em redes sem fio levando em conta a interferência entre nós não vizinhos.

Para modelar o sistema em questão e analisar métricas de desempenho, como probabilidade de bloqueio, probabilidade de descarte, capacidade do sistema, vazão e o número médio de elementos no sistema, apresenta-se um modelo Markoviano de Tempo Contínuo multidimensional que leva em consideração a interferência.

Espera-se que esta pesquisa contribua e auxilie na análise, desenvolvimento e implementação de sistemas reais que façam o uso desta nova tecnologia, permitindo assim:

- ✓ A escolha do melhor tipo de nó levando em conta o tipo de transmissão (*half* ou *full duplex*) e o tipo de antena (direcionais ou omnidirecionais) para as redes multi-hop em linha.
- ✓ A escolha da melhor Relação Sinal Ruído (SNR - *signal-to-noise ratio*) para cada cenário apresentado.
- ✓ Compreender o número de posições de buffer necessárias para atingir a vazão máxima da rede.

1.6 PUBLICAÇÕES

O seguinte artigo foi produzido como resultado das pesquisas relacionadas a este trabalho:

❶ **Modeling and Analysis of Full Duplex Wireless Radios with interference.**

Publicado em ICIS2022 (*13th International Conference on Information and Communication System 2022*).

1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O restante desta dissertação está estruturado da seguinte forma: o Capítulo II apresenta detalhadamente o modelo da rede em estudo e suas aplicações; o Capítulo III apresenta o modelamento da rede usando Cadeias de Markov de Tempo Contínuo, o modelo que considera um sistema sem uso de *buffer* nos nós da rede, e a avaliação de desempenho; o Capítulo IV apresenta o segundo modelamento que considera o uso de *buffer* nos nós da rede e sua avaliação de desempenho; por fim, no Capítulo V são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2: REDES SEM FIO MULTI-HOP

Neste capítulo descrevem-se alguns conceitos fundamentais sobre as redes sem fio *multi-hop*, assim como o cenário da rede estudada nesta dissertação, que é uma rede sem fio *multi-hop* em linha. Finalmente, são apresentados os modos de operação da rede; em cada um dos modos, a rede é composta por um tipo de nó que opera de forma diferente.

2.1 REDES MULTI-HOP

Diferente das redes sem fio tradicionais, onde a comunicação sem fio ocorre apenas na última ligação entre a estação base e o sistema final sem fio, nas redes *multi-hop* existe um ou mais nós intermediários ao longo do caminho que recebem e encaminham pacotes através de enlaces sem fio até o destino, ou seja, esse tipo de rede usa dois ou mais saltos para transmitir informações de uma origem para um destino [32].

Em comparação com as redes tradicionais, as redes *multi-hop* trazem vários benefícios, tais como aumento da cobertura e melhor conectividade. Além disso, a transmissão através de múltiplos enlaces curtos pode exigir menos potência e energia do que enlaces mais longos. Ademais, permitem taxas de dados mais elevadas, que por sua vez resultam numa maior vazão e utilização mais eficiente do espectro [32][33].

As redes sem fio *multi-hop* evitam uma ampla implantação de cabos e podem ser implementadas de forma rentável. Como descrito em [33], essas redes são classificadas de acordo com a estrutura e a aplicação, em:

- ✓ Mobile Ad-hoc Network (MANETs).
- ✓ Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs).
- ✓ Wireless Mesh Networks (WMNs).
- ✓ Wireless Sensor Networks (WSNs).

2.2 CENÁRIO E PRESSUPOSTOS DA REDE UTILIZADA NAS ANÁLISES

A Figura 2.1 ilustra o cenário da rede considerado nesta dissertação. Esta rede foi proposta em [25] e adotada pelos autores de [31] e [34], uma rede sem fio *multi-hop* em linha com tráfego fluindo apenas em um sentido. A rede é composta por quatro nós, sendo eles S, 1, 2 e D.

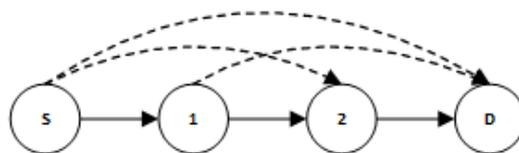


Figura 2.5: Cenário da Rede (Rede sem fio *Multi-hop*).

Diferente dos cenários apresentados em [25], [31] e [34], onde a transmissão de um nó podia alcançar apenas seu vizinho (por exemplo, a transmissão de S só poderia alcançar o nó 1), para o cenário apresentado nesta dissertação, o sinal da transmissão da Fonte (S) pode alcançar até o Destino (D), ou seja, uma transmissão do nó S alcança os nós 1, 2 e D, (por exemplo, quando o nó S transmite para o nó 1, o sinal do nó S chega até aos nós 2 e D). Nosso cenário é aplicável somente nos casos em que há transmissão simultânea. Por exemplo, quando o nó S está transmitindo para o nó 1 e o nó 1 para o nó 2 ao mesmo tempo, o sinal da transmissão de S chega até ao nó 2, obrigando assim ao nó 1 a transmitir para o nó 2 com uma taxa menor do que a taxa que o nó S transmite para o nó 1, pois o nó 2 irá operar com uma relação SINR menor. É importante salientar que embora a transmissão do nó S, por exemplo, alcance os nós 1, 2 e D, o nó S só se comunica com o nó 1, pois considera-se que as recepções em 2 e D não tem relação SNRs altas o suficiente para atender os requisitos de qualidade. Ou seja, o sinal de S chegando aos nós 2 e D são apenas sinais potencialmente interferentes em 2 e D e não caracterizam comunicação direta entre S e 2 ou entre S e D.

Assim, a rede adotada nesta dissertação funciona com base nos seguintes pressupostos:

- ✓ Cada nó pode se comunicar e fazer o sensoriamento de seus vizinhos, mas sua transmissão alcança os demais nós da rede como sinais interferentes.
- ✓ Quando dois ou mais nós estiverem transmitindo ao mesmo tempo na rede, os nós afetados pela interferência deverão transmitir com uma taxa

menor do que a taxa do nó que está transmitindo o sinal interferente. Quanto maior for a interferência, menor será a taxa de transmissão do nó que está sofrendo a interferência. Isso ocorre porque o nó que está sofrendo interferência irá operar com uma relação SINR menor do que o nó que não está sofrendo interferência.

- ✓ O tráfego da rede ocorre em um único sentido, ou seja, da esquerda para direita.
- ✓ Os pacotes entram na rede somente pelo nó S, desta forma, são transmitidos em sequência para o nó 1, nó 2 e terminando a transmissão no nó D, que é o destino da rede.
- ✓ A rede utiliza somente um canal, esse canal é compartilhado por todas as transmissões.
- ✓ Conforme o tipo de nó que a rede utiliza, vários nós poderão receber e transmitir ao mesmo tempo.
- ✓ Não existem colisões na rede, já que todos os nós sabem exatamente quando transmitir e quando ficar em silêncio. Para isso, assume-se que existe um protocolo que controla o compartilhamento do canal.
- ✓ Embora não haja colisão na rede, alguns pacotes podem ser descartados na rede, visto que o nó que recebe o pacote pode não ter espaço disponível no *buffer*.

Nas sessões seguintes descrevem-se os modos de operação que serão analisados.

2.3 MODOS DE OPERAÇÃO DA REDE

Para fazermos a análise de desempenho da rede adotada nesta dissertação, considerou-se inicialmente os mesmos quatro modos de operação considerados em [31][34]. Porém, para o estudo feito nesta dissertação apenas três dos quatro modos são aplicáveis, pois em um dos modos não há interferência, pelo fato de os terminais não transmitirem simultaneamente e, portanto, as análises seriam idênticas às apresentadas em [31][34].

Em cada um desses modos, a rede é constituída por diferentes tipos de nó que operam de diferentes maneiras. Esses nós diferem uns dos outros em termos do número e tipo de antenas utilizadas e da tecnologia de transmissão adotada pelos nós, que podem

ser *half* ou *full duplex*. Dessa maneira, os nós equipados com tecnologia *full duplex* podem transmitir e receber ao mesmo tempo. Por outro lado, os nós equipados com tecnologia *half duplex* podem apenas receber ou transmitir.

Em [30], os autores propuseram um modelo de rádio equipado com duas antenas omnidirecionais, sendo uma para transmissão e outra para a recepção. Por outro lado, os autores de [25] propuseram um modelo de rádio equipado com duas antenas direcionais para transmissão e uma antena omnidirecional para recepção. Os três modos de transmissão considerados nas análises, a seguir definidos, consideram estas duas possibilidades. Assim, os três modos de funcionamento aplicados nessa dissertação são:

- ✓ Modo A [Full, Omni]: Neste modo a rede é composta por nós equipados com tecnologia de transmissão *full duplex* e rádios com duas antenas omnidirecionais, uma para transmissão e outra para recepção, como proposto em [30]
- ✓ Modo B [Half, Direc]: Neste modo, a rede é composta por nós equipados com tecnologia de transmissão *half duplex* e rádios com duas antenas direcionais para transmissão e uma antena omnidirecional para recepção, como foi proposto em [25].
- ✓ Modo C [Full, Direc]: Este modo usa as mesmas configurações que o modo B, com exceção da tecnologia de transmissão, que aqui é a *full duplex*.

Nas subseções seguintes temos uma breve descrição do funcionamento da rede em cada um dos modos de operação apresentados a cima.

2.3.1 MODO A [FULL, OMNI]

Para este modo, a rede é constituída por nós com tecnologia *full duplex* e rádios com duas antenas omnidirecionais, uma para transmissão e outra para recepção. Como podemos observar na Figura 2.2 (a), dois passos são necessários para que a comunicação possa se efetuar do início ao fim da rede neste modo:

- I. Neste passo acontece a transmissão do nó S para o nó 1 com taxa de partida μ_1 , sem interferência, e do nó 1 para o nó 2, com taxa de partida μ_2 , com interferência. Portanto, $\mu_2 < \mu_1$, pois a recepção do nó 2 está

sofrendo interferência da transmissão do nó S, como podemos observar na Figura 2.2.

- II. Neste passo, o nó S não poderá transmitir, pois o nó 1 não conseguiria receber a sua transmissão por causa da interferência que a transmissão do nó 2 causaria na recepção do nó 1, devido ao uso de antenas omnidirecionais. Assim, o nó 2 transmite para o nó D com taxa μ_1 e a comunicação se completa, como ilustrado na parte inferior da Figura 2.2 (a). Todavia, há uma outra possibilidade representada na Figura 2.2 (b), onde o nó 1 e o nó 2 podem transmitir simultaneamente. Caso aconteça essa transmissão, 1 transmitirá com taxa μ_1 e 2 com taxa $\mu_2 < \mu_1$. Aqui começa a transmissão do nó 2 para o nó D e a comunicação se completa.

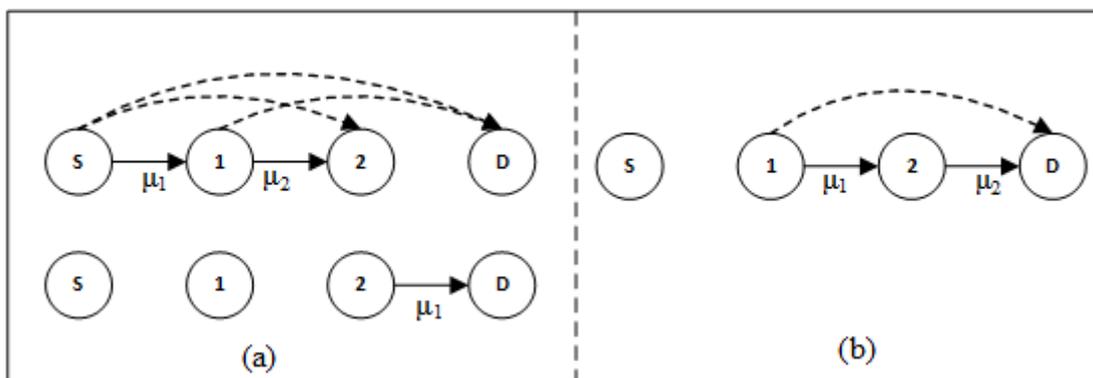


Figura 2.6: Modo de operação A [Full, Omni].

2.3.2 MODO B [HALF, DIREC]

Neste modo de operação a rede é constituída por nós com tecnologia *half duplex* e rádios com duas antenas direcionais para transmissão e uma antena omnidirecional para recepção. Esse modo também precisa executar dois passos para que a comunicação se efetue do início ao fim da rede, como ilustrado na Figura 2.3:

- I. Aqui o nó 1 está recebendo uma transmissão do nó S com taxa μ_1 ; todavia, o nó 1 não pode transmitir para o nó 2, pois os nós nesse modo utilizam a tecnologia de transmissão *half duplex*. Por outro lado, o nó 2 pode transmitir para D (destino) com taxa μ_3 , visto que sua transmissão não afeta a recepção do nó 1 devido ao uso de antenas direcionais. Como há interferência do nó S na recepção do nó D, tem-se $\mu_3 < \mu_1$.

- II. Neste passo acontece a transmissão do nó 1 para o nó 2 com taxa μ_1 . Como os nós utilizam tecnologia de transmissão *half duplex*, então nenhum deles pode transmitir e receber ao mesmo tempo. Aqui o nó S não pode transmitir porque o nó 1 não pode receber, o nó 2 não pode transmitir porque já está recebendo a transmissão do nó 1.

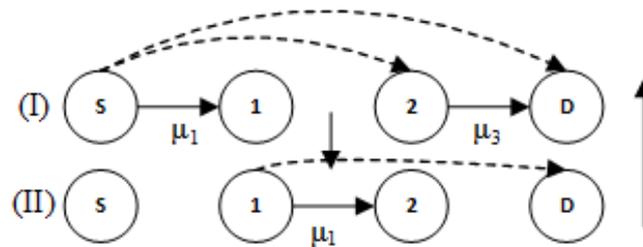


Figura 2.7: Modo de operação B [Half, Direc].

2.3.3 MODO C [FULL, DIREC]

Neste modo de operação a rede é constituída por nós com tecnologia de transmissão *full duplex* e rádios com duas antenas direcionais para a transmissão e uma antena omnidirecional para recepção. Aqui, apenas um passo é necessário para completar uma transmissão na rede. A Figura 2.4 ilustra o funcionamento deste modo:

Neste passo acontecem as transmissões dos nós S, 1 e 2 simultaneamente. No entanto, cada nó transmite com taxa diferente, sendo que essa taxa depende da interferência que o nó sofre: quando o nó S está transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , sem interferência, sua transmissão afeta as recepções dos nós 1, 2 e D. Dessa forma, o nó 1 transmite para o nó 2 com taxa $\mu_2 < \mu_1$, pois há interferência da transmissão do nó S. A transmissão do nó 1 também afeta a recepção do nó D, então, quando S e 1 estão transmitindo simultaneamente, a transmissão do nó 2 para o nó D ocorre com uma taxa $\mu_4 < \mu_2$, pois há interferência dos sinais de S e 1 no nó D, como ilustrado na Figura 2.4 (a). Ainda há uma outra possibilidade que é o nó 2 estar transmitindo para o nó D simultaneamente com a transmissão do nó S; neste caso a transmissão de 2 para D ocorre com taxa $\mu_3 < \mu_2$, como ilustra a Figura 2.4 (b). Por fim, se o nó 2 e o nó 1 estiverem transmitindo simultaneamente, a transmissão de 2 para D ocorre com a taxa μ_2 já descrita.

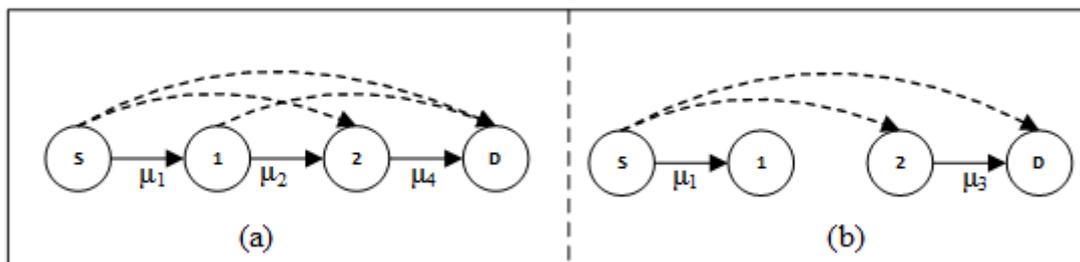


Figura 2.8: Modo de operação C [Full, Direc].

2.4 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos fundamentais das redes sem fio *multi-hop*, onde podemos entender que esse tipo de rede usa um ou mais saltos para transmitir informações de uma origem para um destino, operando de forma diferente das redes sem fio convencionais, onde tradicionalmente as comunicações são suportadas por uma infraestrutura fixa central. As redes *multi-hop* trazem vários benefícios como: aumento da cobertura e melhor conectividade. Além disso, apresentaram-se também o cenário, os pressupostos da rede e os modos de funcionamento da rede que será utilizada nas análises desta dissertação, onde foram descritos os três modos de funcionamento da rede considerada nesta dissertação.

CAPÍTULO 3: ANÁLISE DE DESEMPENHO DA REDE SEM FIO MULTI-HOP FULL DUPLEX CONSIDERANDO A INTERFERÊNCIA, MODELO SEM BUFFER

Neste capítulo apresentamos a avaliação de desempenho da rede estudada, modelando cada um dos modos apresentado no capítulo anterior e considerando um modelo em que não há *buffer* nos nós.

Antes de modelarmos os modos de operação descritos anteriormente, descrevemos algumas considerações gerais para cada um desses modos, a matriz de transição e as probabilidades em regime estacionário. Finalmente definimos as métricas de desempenho, onde também descrevemos os cálculos das taxas de partida considerando a interferência e depois analisamos cada modo de operação. Em cada um dos modos de operação descrevemos o conjunto de estados possíveis, o diagrama de estados, os eventos que geram as transições e as equações usadas para o modelamento.

3.1 ANÁLISE DA CADEIA DE MARKOV DE TEMPO CONTÍNUO

Utilizamos cadeias de Markov de tempo contínuo multidimensionais para modelarmos cada um dos modos de operação, onde as transições ocorrem devido à chegada e partida de pacotes na rede e da transmissão de um nó para outro. O processo de chegada de pacotes segue uma distribuição de *Poisson* com taxa média de chegada igual a λ pacotes / segundos. O tempo de serviço em cada nó segue uma distribuição exponencial com valor médio igual a $1/\mu_n$ segundos, onde μ_n é a taxa de partida máxima ou taxa de serviço corrente no nó; essa taxa varia dependendo da interferência, o subscrito n diferencia as taxas em função da interferência que está sendo experimentada.

Cada um dos estados das cadeias analisadas nessa dissertação é representado da seguinte maneira: $x = \{i(wi), j(wj), k(wk)\}$, (1)

onde:

- ✓ i representa a existência (1) ou não (0) de uma transmissão do nó S para o nó 1.
- ✓ wi representa o número de pacotes em espera no nó S .

- ✓ j representa a existência (1) ou não (0) de uma transmissão do nó 1 para o nó 2.
- ✓ w_j representa o número de pacotes em espera no nó 1.
- ✓ k representa a existência (1) ou não (0) de uma transmissão do nó 2 para o nó D.
- ✓ w_k representa o número de pacotes em espera no nó 2.

Para simplificar a notação, denomina-se $i(w_i)$ como servidor i , $j(w_j)$ como servidor j , e $k(w_k)$ como servidor k , todas essas dimensões assumem somente valores inteiros. Os valores 1 e 0 são atribuídos nas dimensões i, j, k caso esteja ocorrendo uma transmissão (1) ou não (0), assim sendo, $0 \leq i, j, k \leq 1$. As dimensões w_i, w_j, w_k assumem valores que vão de zero até o tamanho do *buffer*, sendo assim, $0 \leq w_i, w_j, w_k \leq \text{buffer}$. Pode-se ter no máximo três transmissões em um dado momento, isto é, $i + j + k \leq 3$.

Por ser complexa e trabalhosa a resolução de cadeias de Markov onde os estados têm seis dimensões, neste estudo, consideramos em um primeiro estágio, por simplificação, um modelamento onde apenas um pacote pode estar em um servidor, em transmissão ou em espera. Essas limitações constituem um cenário onde não existe *buffer*, pois apenas um pacote pode estar em um servidor em dado instante. Embora seja um modelo transitório, podemos efetuar nele toda a análise de desempenho que será feita no modelamento com *buffer*, onde em um servidor pode haver mais de um pacote. Nesses modelos as filas são acopladas, ou seja, o comportamento do estado de uma fila, depende do estado de outra fila. O que dificulta uma análise mais generalizada. Na próxima sessão, temos a descrição detalhada do modelo sem *buffer*.

3.2 MODELO SEM BUFFER

Neste modelo, o número total de pacotes em um servidor, não pode ser maior que 1. Note que nesse modelo existe uma posição de serviço que é ocupada por um pacote em transmissão ou por um pacote aguardando transmissão, mas não há *buffer* para armazenamento de outros pacotes em espera. O pacote pode estar em transmissão quando $i = 1$ e $w_i = 0$, ou em espera quando $i = 0$ e $w_i = 1$. Assim sendo, $i + w_i \leq 1; j + w_j \leq 1; k + w_k \leq 1$ e $0 \leq i, w_i, j, w_j, k, w_k \leq 1$. Por outro lado, o somatório das dimensões $w_i + w_j + w_k$ não pode ser igual a 3, pois isso significaria que os três servidores têm pacotes em espera e nenhum está transmitindo, então, $w_i + w_j + w_k \leq 2$.

3.2.1 MODO A [FULL, OMNI]

Neste modo de operação pode-se ter no máximo 2 servidores transmitindo simultaneamente. Assim sendo, $i + j + k \leq 2$. Os servidores i e j podem transmitir ao mesmo tempo, no entanto o servidor j transmitirá para o servidor k com uma taxa de partida menor que a do servidor i , isto acontece porque a recepção do servidor k está sofrendo interferência do servidor i . Já os servidores i e k não podem transmitir ao mesmo tempo, logo $i + k \leq 1$. Por outro lado w_j será sempre 0, pois j pode transmitir ao mesmo tempo que o servidor i e ao mesmo tempo que o servidor k , ou seja, sempre que ele receber um pacote poderá logo transmiti-lo. Assim, o conjunto de estados fica definido da seguinte maneira:

$$S = \{x \mid 0 \leq i, w_i, j, k, w_k \leq 1; i+j+k \leq 2; i+k \leq 1; i+w_i \leq 1; k+w_k \leq 1; w_j=0 \} \quad (2)$$

3.2.1.1 DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS

A Figura 3.1 mostra o diagrama de todas as transições que representam a cadeia de Markov para este modo, no qual constam todos os possíveis estados, transições e as suas respectivas taxas; por simplicidade, nas figuras que mostram os diagramas de transição, omitiu-se os parênteses “()”. Todas as transições de estados possíveis são modeladas e expostas na Tabela 1, onde a coluna (estado destino) representa o estado destino da transição, a coluna (taxa) representa a taxa com que a transição ocorre, finalmente a coluna (condição) representa o conjunto de condições necessárias para que as transições possam ocorrer. Abaixo temos a descrição de todas essas transições ilustrada na Figura 3.1:

O estado inicial do sistema é o estado $0(0),0(0),0(0)$, nesse estado não há nenhum pacote na rede.

1. No estado $0(0),0(0),0(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $1(0),0(0),0(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
2. No estado $1(0),0(0),0(0)$, a transmissão do nó S para o nó 1 ocorre com taxa μ_1 , o término dessa transmissão leva o sistema para o estado $0(0),1(0),0(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2.

3. No estado $0(0),1(0),0(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2 com taxa μ_1 , o término dessa transmissão leva o sistema para o estado $0(0),0(0),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido para o destino.
4. No estado $0(0),1(0),0(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $1(0),1(0),0(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó S para o nó 1, simultaneamente à transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2.
5. No estado $0(0),0(0),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino D, com taxa μ_1 , levando assim o sistema para o estado $0(0),0(0),0(0)$, onde não há nenhum pacote na rede.
6. No estado $0(0),0(0),1(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $0(1),0(0),1(0)$, onde este pacote é colocado em espera no nó S.
7. No estado $1(0),1(0),0(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, com taxa μ_1 ; o término dessa transmissão leva o sistema para o estado $0(0),1(0),0(0)$, onde este pacote é descartado no nó 1, pois já existe um pacote no nó 1 e não há *buffer* nos nós.
8. No estado $1(0),1(0),0(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, com taxa $\mu_2 < \mu_1$, devido à interferência da transmissão do nó S na recepção do nó 2; o término dessa transmissão leva o sistema para o estado $1(0),0(0),0(1)$, onde o pacote é colocado em espera no nó 2.
9. No estado $0(1),0(0),1(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino (D), com taxa μ_1 , levando assim o sistema para o estado $1(0),0(0),0(0)$, onde o pacote que estava em espera no nó S começa a ser transmitido para o nó 1.
10. No estado $1(0),0(0),0(1)$ acontece a transmissão do pacote do no S para o nó 1, com taxa μ_1 ; o término dessa transmissão leva o sistema para o estado $0(0),1(0),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2 e automaticamente o pacote que estava em espera no nó 2 começa a ser transmitido para o nó de destino (D).
11. No estado $0(0),1(0),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, com taxa μ_1 , levando assim o sistema para o estado $0(0),0(0),1(0)$, onde o pacote é descartado no nó 2, pois já existe um pacote no nó 2 e não há *buffer* nos nós.

12. No estado $0(0),1(0),1(0)$ acontece a transmissão para o nó destino (D), com taxa $\mu_2 < \mu_1$, pois o nó de destino está sofrendo interferência da transmissão do nó 1. Essa transmissão leva o sistema para o estado $0(0),1(0),0(0)$.
13. No estado $0(0),1(0),1(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $0(1),1(0),1(0)$, onde este pacote é colocado em espera no nó S.
14. No estado $0(1),1(0),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ_1 , essa transmissão leva o sistema para o estado $0(1),0(0),1(0)$, onde o pacote é descartado no nó 2, pois já existe um pacote no nó 2.
15. No estado $0(1),1(0),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino (D), com taxa $\mu_2 < \mu_1$; essa transmissão leva o sistema para o estado $1(0),1(0),0(0)$, onde o pacote em espera no nó S começa a ser transmitido para o nó 1.

Nos estados $1(0), j(wj), 0(wk)$, e $0(1),j(wj),1(wk)$ ocorrerá o bloqueio de um novo pacote que chegar no nó S, isso acontece porque apenas um pacote pode estar em um servidor.

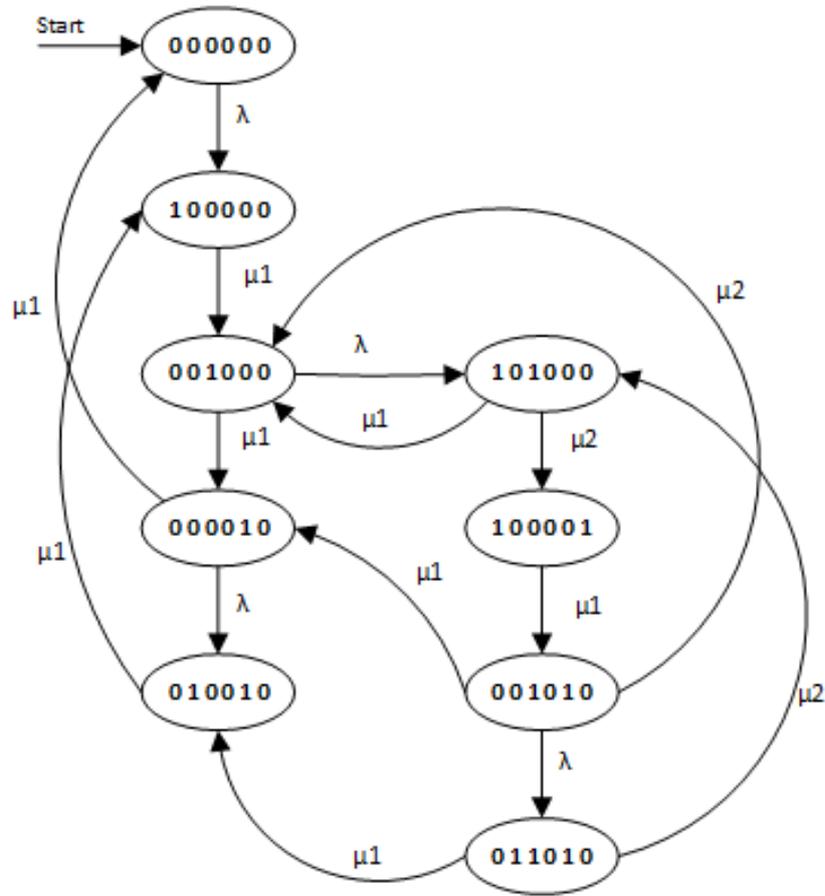


Figura 3.1: Modo de operação A [Full, Omni] diagrama de transição de estados sem buffer.

Tabela 3.1 – Modo A[Full,Omni] equações de transições sem buffer

Evento	Estado Destino	Taxa	Condição
1	$i + 1, wi, j, wj, k, wk$	λ	$i = 0; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 0; wk = 0$
2	$i - 1, wi, j + 1, wj, k, wk$	μ_1	$i = 1; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 0; wk = 0$
3	$i, wi, j - 1, wj, k + 1, wk$	μ_1	$i = 0; wi = 0; j = 1; wj = 0; k = 0; wk = 0$
4	$i + 1, wi, j, wj, k, wk$	λ	$i = 0; wi = 0; j = 1; wj = 0; k = 0; wk = 0$
5	$i, wi, j, wj, k - 1, wk$	μ_1	$i = 0; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 1; wk = 0$
6	$i, wi + 1, j, wj, k, wk$	λ	$i = 0; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 1; wk = 0$
7	$i - 1, wi, j, wj, k, wk$	μ_1	$i = 1; wi = 0; j = 1; wj = 0; k = 0; wk = 0$
8	$i, wi, j - 1, wj, k, wk + 1$	μ_2	$i = 1; wi = 0; j = 1; wj = 0; k = 0; wk = 0$
9	$i + 1, wi - 1, j, wj, k - 1, wk$	μ_1	$i = 0; wi = 1; j = 0; wj = 0; k = 1; wk = 0$
10	$i - 1, wi, j + 1, wj, k + 1, wk - 1$	μ_1	$i = 1; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 0; wk = 1$
11	$i, wi, j - 1, wj, k, wk$	μ_1	$i = 0; wi = 0; j = 1; wj = 0; k = 1; wk = 0$
12	$i, wi, j, wj, k - 1, wk$	μ_2	$i = 0; wi = 0; j = 1; wj = 0; k = 1; wk = 0$

13	$i, wi + 1, j, wj, k, wk$	λ	$i = 0; wi = 0; j = 1; wj = 0; k = 1; wk = 0$
14	$i, wi, j - 1, wj, k, wk$	μ_1	$i = 0; wi = 1; j = 1; wj = 0; k = 1; wk = 0$
15	$i + 1, wi - 1, j, wj, k - 1, wk$	μ_2	$i = 0; wi = 1; j = 1; wj = 0; k = 1; wk = 0$

3.2.2 MODO B [HALF, DIREC]

Neste modo de operação, como no anterior, também podemos ter no máximo 2 servidores transmitindo ao mesmo tempo, assim sendo, $i + j + k \leq 2$. Neste modo o servidor j não transmite ao mesmo tempo com o servidor i ou k . já o servidor i pode transmitir simultaneamente com o servidor k , logo, $i + j \leq 1; j + k \leq 1$. Aqui, sempre que o servidor j termina uma transmissão, o servidor k inicia sua transmissão, dessa maneira o servidor k não coloca pacotes em espera. O conjunto de estados fica definido da seguinte maneira:

$$S = \{x \mid 0 \leq i, wi, j, wj, k \leq 1; i+j+k \leq 2; i+j \leq 1; j+k \leq 1; i+wi \leq 1; j+wj \leq 1; wk=0\} \quad (3)$$

3.2.2.1 DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS

A Figura 3.2 mostra o diagrama de todas as transições que representam a cadeia de Markov para este modo, no qual constam todos os possíveis estados, transições e as suas respectivas taxas. Todas as transições de estados possíveis são modeladas e expostas na Tabela 2, onde a coluna (estado destino) representa o estado destino da transição, a coluna (taxa) representa a taxa com que a transição ocorre, finalmente a coluna (condição) representa o conjunto de condições necessárias para que as transições possam ocorrer. Abaixo temos a descrição de todas essas transições ilustradas na Figura 3.2:

O estado inicial do sistema é o estado $0(0),0(0),0(0)$, nesse estado não há nenhum pacote na rede.

1. No estado $0(0),0(0),0(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $1(0),0(0),0(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
2. No estado $1(0),0(0),0(0)$ ocorre a transmissão do nó S para o nó 1, com taxa μ_1 ; essa transmissão leva o sistema para o estado $0(0),1(0),0(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2.

3. No estado $0(0),1(0),0(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, com taxa μ_1 , essa transmissão leva o sistema para o estado $0(0),0(0),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido para o destino.
4. No estado $0(0),1(0),0(0)$, a chegada um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $0(1),1(0),0(0)$, onde este pacote é colocado em espera no nó S.
5. No estado $0(0),0(0),1(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino (D), com taxa μ_1 , levando assim o sistema para o estado $0(0),0(0),0(0)$, onde não há nenhum pacote na rede.
6. No estado $0(0),0(0),1(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $1(0),0(0),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
7. No estado $0(1),1(0),0(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, com taxa μ_1 ; essa transmissão leva o sistema para o estado $1(0),0(0),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó de destino (D), e o pacote em espera no nó S, começa a ser transmitido para o nó 1.
8. No estado $1(0),0(0),1(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, com taxa μ_1 , levando o sistema para o estado $0(0),0(1),1(0)$, onde o pacote é colocado em espera no nó 1.
9. No estado $1(0),0(0),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino (D), com taxa $\mu_3 < \mu_1$, devido à interferência que o nó de destino (D) está sofrendo da transmissão do nó S, levando assim o sistema para o estado $1(0),0(0),0(0)$.
10. No estado $0(0),0(1),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino (D), com taxa μ_1 , levando o sistema para o estado $0(0),1(0),0(0)$, onde o pacote em espera no nó 1 começa a ser transmitido para o nó 2.
11. No estado $0(0),0(1),1(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $1(0),0(1),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
12. No estado $1(0),0(1),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, com taxa μ_1 , levando o sistema para o estado $0(0),0(1),1(0)$, onde o pacote é descartado no nó 1, isso porque já existe um pacote nesse mesmo nó e não há *buffer* no nó.

13. No estado $1(0),0(1),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino (D), com taxa $\mu_3 < \mu_1$, levando o sistema para o estado $1(0),0(1),0(0)$. Aqui o nó destino está sofrendo interferência da transmissão do nó S, logo, o nó 2 transmite com uma taxa menor, μ_3 .
14. No estado $1(0),0(1),0(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, com taxa μ_1 , levando o sistema para o estado $0(0),1(0),0(0)$, onde o pacote é descartado no nó 1, isso porque já existe um pacote nesse mesmo nó. Esse pacote que já estava no nó 1 começa então a ser transmitido para o nó 2.

Nos estados $1(0)$, $0(wj)$, $k(0)$, e $0(1),1(wj),0(0)$ ocorrerá o bloqueio de um novo pacote que chegar no nó S, isso acontece porque apenas um pacote pode estar em um servidor.

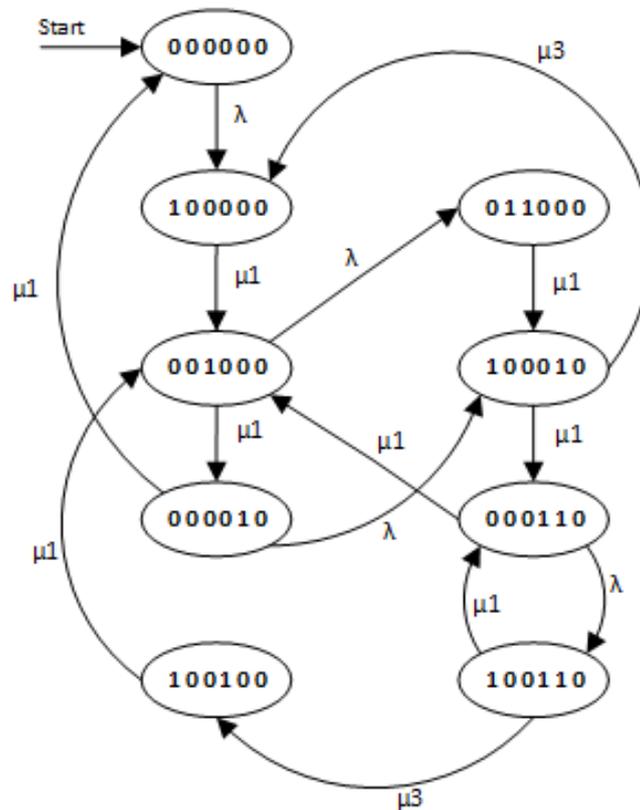


Figura 3.2: Modo de operação B [Half, Direc] diagrama de transição de estados sem buffer.

Evento	Estado Destino	Taxa	Condição
1	$i + 1, wi, j, wj, k, wk$	λ	$i = 0; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 0; wk = 0$
2	$i - 1, wi, j + 1, wj, k, wk$	μ_1	$i = 1; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 0; wk = 0$
3	$i, wi, j - 1, wj, k + 1, wk$	μ_1	$i = 0; wi = 0; j = 1; wj = 0; k = 0; wk = 0$
4	$i + 1, wi, j, wj, k, wk$	λ	$i = 0; wi = 0; j = 1; wj = 0; k = 0; wk = 0$
5	$i, wi, j, wj, k - 1, wk$	μ_1	$i = 0; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 1; wk = 0$
6	$i + 1, wi, j, wj, k, wk$	λ	$i = 0; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 1; wk = 0$
7	$i + 12, wi - 1, j - 1, wj, k + 1, wk$	μ_1	$i = 0; wi = 1; j = 1; wj = 0; k = 0; wk = 0$
8	$i - 1, wi, j, wj + 1, k, wk$	μ_1	$i = 1; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 1; wk = 0$
9	$i, wi, j, wj, k - 1, wk$	μ_3	$i = 1; wi = 0; j = 0; wj = 0; k = 1; wk = 0$
10	$i, wi, j + 1, wj - 1, k - 1, wk$	μ_1	$i = 0; wi = 0; j = 0; wj = 1; k = 1; wk = 0$
11	$i + 1, wi, j, wj, k, wk$	λ	$i = 0; wi = 0; j = 0; wj = 1; k = 1; wk = 0$
12	$i - 1, wi, j, wj, k, wk$	μ_1	$i = 1; wi = 0; j = 0; wj = 1; k = 1; wk = 0$
13	$i, wi, j, wj, k - 1, wk$	μ_3	$i = 1; wi = 0; j = 0; wj = 1; k = 1; wk = 0$
14	$i - 1, wi, j + 1, wj - 1, k, wk$	μ_1	$i = 1; wi = 0; j = 0; wj = 1; k = 0; wk = 0$

Tabela 3.2 – Modo B[Half, Direc] equações de transições sem buffer.

3.2.3 MODO C [FULL, DIREC]

Neste modo de operação todos os servidores podem transmitir simultaneamente, assim sendo, $i + j + k \leq 3$. No entanto, cada servidor transmitirá com taxa diferente um do outro. Por outro lado, todas as posições de espera serão sempre 0, ou seja, $wi = 0, wj = 0, wk = 0$. Para este modo o conjunto de estados fica definido da seguinte maneira:

$$S = \{x | 0 \leq i, j, k \leq 1; i + j + k \leq 3; wi = 0; wj = 0; wk = 0\} \quad (4)$$

3.2.3.1 DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS

A Figura 3.3 mostra o diagrama de todas as transições que representam a cadeia de Markov para este modo, no qual constam todos os possíveis estados, transições e as suas respectivas taxas. Todas as transições de estados possíveis são modeladas e expostas na Tabela 3, onde a coluna (estado destino) representa o estado destino da transição, a coluna (taxa) representa a taxa com que a transição ocorre e a coluna (condição) representa o conjunto de condições necessárias para que as transições possam ocorrer. Abaixo temos a descrição de todas essas transições ilustrada na Figura 3.3:

O estado inicial do sistema é o estado $0(0),0(0),0(0)$, nesse estado não há nenhum pacote na rede.

1. No estado $0(0),0(0),0(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $1(0),0(0),0(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
2. No estado $1(0),0(0),0(0)$ acontece a transmissão do pacote do S para o nó 1, com taxa μ_1 , levando o sistema para o estado $0(0),1(0),0(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2.
3. No estado $0(0),1(0),0(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, com taxa μ_1 , levando o sistema para o estado $0(0),0(0),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido para o destino (D).
4. No estado $0(0),1(0),0(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $1(0),1(0),0(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
5. No estado $0(0),0(0),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino (D), com taxa μ_1 , levando o sistema para o estado $0(0),0(0),0(0)$, onde não há nenhum pacote na rede.
6. No estado $0(0),0(0),1(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $1(0),0(0),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
7. No estado $1(0),1(0),0(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, com taxa μ_1 , levando o sistema para o estado $0(0),1(0),0(0)$, onde este pacote é descartado no nó 1, isso porque já este um pacote neste nó.
8. No estado $1(0),1(0),0(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, com taxa $\mu_2 < \mu_1$, pois o nó 2 está sofrendo interferência da transmissão do nó S. Essa transmissão leva o sistema para o estado $1(0),0(0),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino (D).
9. No estado $1(0),0(0),1(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, com taxa μ_1 , levando assim o sistema para o estado $0(0),1(0),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2.
10. No estado $1(0),0(0),1(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino (D), com taxa $\mu_3 < \mu_1$, pois há a interferência que o nó de destino (D) está

sofrendo da transmissão do nó S, levando assim o sistema para o estado $1(0),0(0),0(0)$.

11. No estado $0(0),1(0),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, com taxa μ_1 , levando o sistema para o estado $0(0),0(0),1(0)$, onde o pacote é descartado do nó 2, pois já existe um pacote neste nó.
12. No estado $0(0),1(0),1(0)$, acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino (D) com taxa $\mu_2 < \mu_1$, essa transmissão leva o sistema para o estado $0(0),1(0),0(0)$. Aqui o nó destino está sofrendo interferência da transmissão do nó S, logo, o nó 2 deve transmitir com uma taxa menor.
13. No estado $0(0),1(0),1(0)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para o estado $1(0),1(0),1(0)$, onde este pacote começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
14. No estado $1(0),1(0),1(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, com taxa μ_1 , levando o sistema para o estado $0(0),1(0),1(0)$, onde o pacote é descartado no nó 1, pois já existe um pacote neste nó.
15. No estado $1(0),1(0),1(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que com taxa $\mu_2 < \mu_1$, levando o sistema para o estado $1(0),0(0),1(0)$, onde o pacote é descartado no nó 2, pois já existe um pacote neste nó. Aqui o nó 2 está sofrendo interferência da transmissão do nó S, logo, o nó 1 deve transmitir com uma taxa menor.
16. No estado $1(0),1(0),1(0)$ acontece a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino (D), com taxa μ_4 , levando o sistema para o estado $1(0),1(0),0(0)$. Aqui o nó destino (D) está sofrendo dupla interferência das transmissões dos nós S e 1, logo, o nó 2 deve transmitir com uma taxa muito menor que as taxas de S e 1. Portanto, $\mu_4 < \mu_1$; $\mu_4 < \mu_2$.

Nos estados $1(0), j(0), k(0)$ ocorrerá o bloqueio de um novo pacote que chegar no nó S, isso acontece porque apenas um pacote pode estar em um servidor.

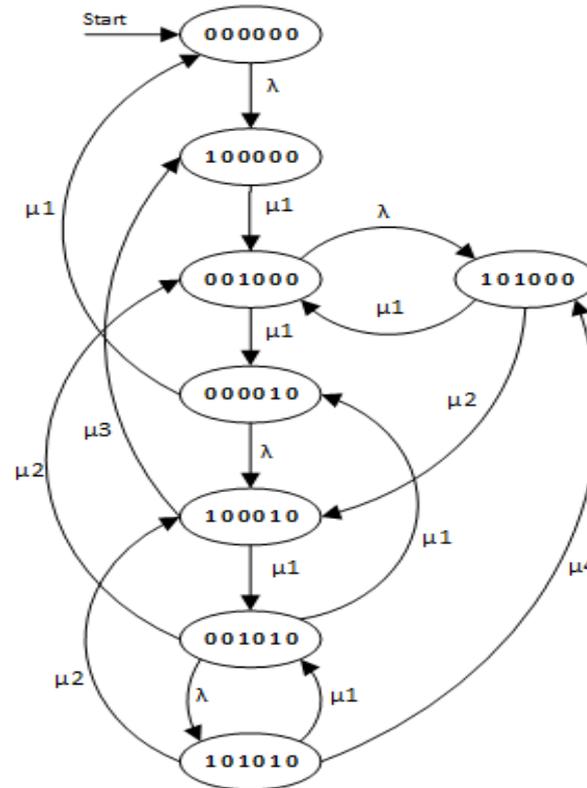


Figura 3.3: Modo de operação C [Full, Direc] diagrama de transição de estados sem buffer.

Evento	Estado Destino	Taxa	Condição
1	$i + 1, w_i, j, w_j, k, w_k$	λ	$i = 0; w_i = 0; j = 0; w_j = 0; k = 0; w_k = 0$
2	$i - 1, w_i, j + 1, w_j, k, w_k$	μ_1	$i = 1; w_i = 0; j = 0; w_j = 0; k = 0; w_k = 0$
3	$i, w_i, j - 1, w_j, k + 1, w_k$	μ_1	$i = 0; w_i = 0; j = 1; w_j = 0; k = 0; w_k = 0$
4	$i + 1, w_i, j, w_j, k, w_k$	λ	$i = 0; w_i = 0; j = 1; w_j = 0; k = 0; w_k = 0$
5	$i, w_i, j, w_j, k - 1, w_k$	μ_1	$i = 0; w_i = 0; j = 0; w_j = 0; k = 1; w_k = 0$
6	$i + 1, w_i, j, w_j, k, w_k$	λ	$i = 0; w_i = 0; j = 0; w_j = 0; k = 1; w_k = 0$
7	$i - 1, w_i, j, w_j, k, w_k$	μ_1	$i = 1; w_i = 0; j = 1; w_j = 0; k = 0; w_k = 0$
8	$i, w_i, j - 1, w_j, k + 1, w_k$	μ_2	$i = 1; w_i = 0; j = 1; w_j = 0; k = 0; w_k = 0$
9	$i - 1, w_i, j + 1, w_j, k, w_k$	μ_1	$i = 1; w_i = 0; j = 0; w_j = 0; k = 1; w_k = 0$
10	$i, w_i, j, w_j, k - 1, w_k$	μ_3	$i = 1; w_i = 0; j = 0; w_j = 0; k = 1; w_k = 0$
11	$i, w_i, j - 1, w_j, k, w_k$	μ_1	$i = 0; w_i = 0; j = 1; w_j = 0; k = 1; w_k = 0$
12	$i, w_i, j, w_j, k - 1, w_k$	μ_2	$i = 0; w_i = 0; j = 1; w_j = 0; k = 1; w_k = 0$
13	$i + 1, w_i, j, w_j, k, w_k$	λ	$i = 0; w_i = 0; j = 1; w_j = 0; k = 1; w_k = 0$
14	$i - 1, w_i, j, w_j, k, w_k$	μ_1	$i = 1; w_i = 0; j = 1; w_j = 0; k = 1; w_k = 0$
15	$i, w_i, j - 1, w_j, k, w_k$	μ_2	$i = 1; w_i = 0; j = 1; w_j = 0; k = 1; w_k = 0$
16	$i, w_i, j, w_j, k - 1, w_k$	μ_4	$i = 1; w_i = 0; j = 1; w_j = 0; k = 1; w_k = 0$

Tabela 3.3 – Modo C[Full, Direc] equações de transições sem buffer.

3.3 MATRIZ DE TRANSIÇÃO E PROBABILIDADE EM REGIME ESTACIONÁRIO

Matriz de transição é a união de todos os vetores de probabilidade em uma matriz. As probabilidades em regime estacionário $\pi(x)$ são calculadas por meio da matriz de transição e também da equação de normalização, determinadas pela Equação (5),

$$\pi Q = 0, \sum_{x \in S} \pi(x) = 1 \quad (5)$$

onde π representa o vetor das probabilidades estacionárias, Q a matriz de transição, S o conjunto de estados possíveis e x um determinado estado. Na matriz Q , calculamos para cada estado a soma total de suas taxas de transições. Após encontrarmos as somas q_{xy} para todo $x, y (x \neq y) \in S$, podemos então encontrar os elementos da diagonal principal da matriz, $q_{xx} \quad x \in S$, por meio da Equação (6):

$$q_{xx} = - \sum_{y \in S, y \neq x} q_{xy} = 1 \quad (6)$$

O método utilizado para efetuar os cálculos das probabilidades em regime estacionário foi implementado da seguinte maneira:

- a. Através das equações de transição, gera-se o conjunto de estados S e a matriz de transição Q . Partindo do estado inicial, testa-se as condições de todos os eventos de transição, se o estado cumprir com as condições, realiza-se a transição nesse estado, esta transição é adicionada à matriz de transições e, em seguida, insere-se o estado resultante na matriz de estados, caso se trate de um novo estado. O Anexo A mostra com detalhes este procedimento.
- b. Através da Equação (6), encontramos os elementos da diagonal principal da matriz Q .
- c. Através da Equação (5), encontramos as probabilidades em regime estacionário.

Todos os cálculos efetuados para a avaliação de desempenho nesta dissertação foram feitos no Matlab, que é uma ferramenta computacional para cálculos matemáticos. Na próxima seção apresentamos as métricas de desempenho, onde antes apresentamos o cálculo das taxas de partida na presença de interferência para depois calcular as métricas de desempenho.

3.4 MÉTRICAS DE DESEMPENHO PARA O MODELO SEM BUFFER

Esta seção apresenta as métricas de desempenho dos modos de operação apresentados nas sessões anteriores. Para cada um desses modos é apresentado a avaliação de desempenho e também a comparação entre eles. Os parâmetros utilizados em cada análise são: taxa de chegada de pacotes, λ , variando de 1 a 10 pacotes/segundo, taxa de serviço sem interferência, $\mu_1 = 10$ pacotes/segundos com $SNR_1=10$, $\mu_1 = 16,4$ com $SNR_1=50$ e $\mu_1 = 19,25$ com $SNR_1=100$.

Para $SNR_1 = 10$, a taxa de partida dos pacotes (taxa de serviço) foi arbitrada como sendo $\mu_1 = 10$ pacotes/segundos. Para definir as taxas de serviço para $SNR_1=50$ e $SNR_1=100$ considerou-se que a taxa de serviço para cada valor de SNR é proporcional à correspondente capacidade do canal definida pelo teorema de Shannon, dado pela Equação (7), onde, para efeito de normalização, considera-se $B = 1$ Hz:

$$\Phi = B \times \log_2(1 + SNR) \quad (7)$$

Denotando K como o fator de proporcionalidade entre μ_1 e Φ , temos:

$$\mu_1 = K \times \log_2(1 + SNR) \quad (8)$$

Como arbitrou-se $\mu_1 = 10$ para $SNR_1=10$, temos $10 = K \times \log_2(11)$ e $K = 2,8906$. Para os demais valores de SNR , a taxa de serviço pode então ser obtida pela Equação (8), com o valor de K calculado e a correspondente SNR desejada. Assim, para $SNR_1=50$ tem-se $\mu_1 = 2,8906 \times \log_2(51) = 16,4$ e para $SNR_1 = 100$ tem-se $\mu_1 = 2,8906 \times \log_2(101) = 19,25$.

De outra forma, para cada valor de SNR desejado, o valor de μ_1 é o valor arbitrado para $SNR = 10$, $\mu_1 = 10$, multiplicado pela relação entre a capacidade de canal para a SNR desejada e a capacidade de canal para $SNR = 10$, ou seja $\mu_1 = 10 * \frac{\log_2(1+SNR)}{\log_2(11)}$

Toda análise de desempenho é feita em função da taxa de chegada de pacotes, λ . Por outro lado, como descrito nas sessões anteriores, além da taxa de serviço na ausência de interferência, μ_1 , existem as taxas de serviço quando levamos em conta a interferência, que são elas: μ_2 , μ_3 e μ_4 ; os valores dessas taxa são calculados em função da taxa sem interferência μ_1 . Portanto, antes de apresentamos as métricas de desempenho, é necessário primeiramente apresentarmos os cálculos para encontrarmos

os valores dessas respectivas taxas, a próxima subseção apresenta em detalhes os cálculos das taxas de serviço levando em conta a interferência.

Para calcularmos as taxas de serviço em cada enlace, levando em conta a interferência, de forma similar ao apresentado para os cálculos para diferentes valores de SNR na condição sem interferência, vamos considerar que a taxa de serviço com interferência é igual à taxa de serviço sem interferência multiplicado pela relação entre a capacidade do canal com interferência e a capacidade do canal sem interferência, ambas calculadas utilizando novamente a Equação (7) com $B = 1$ Hz.

Para o cálculo da capacidade na situação em que há interferência, é preciso determinar a relação SNR nesta condição. Sabemos que a SNR é dada pela Equação (9):

$$SNR = \frac{Pr}{N} \quad (9)$$

Onde Pr é a potência do sinal recebido e N é a potência do ruído.

A potência recebida Pr é calculada por meio da Equação (10):

$$Pr = \frac{Pt * Gt * Gr}{L} \quad (10)$$

Onde Pt é a potência de transmissão, Gt e Gr são os ganhos na transmissão e recepção respectivamente e L é a atenuação no espaço livre, calculada por:

$$L = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (11)$$

Onde r é o comprimento do enlace e λ é o comprimento de onda do sinal.

Para melhor compreensão, observe a Figura 3.4, ela ilustra um cenário onde três nós estão transmitindo simultaneamente, mas com taxas diferentes, por causa da interferência. A transmissão do nó S para o nó 1 acontece sem nenhuma interferência com taxa μ_1 , nesse enlace a atenuação no espaço livre é $L_1 = L$. O sinal que o nó S transmite para o nó 1 é recebido com potência $Pr_1 = Pr$. Assim, a relação sinal ruído é calculada por meio da Equação (12).

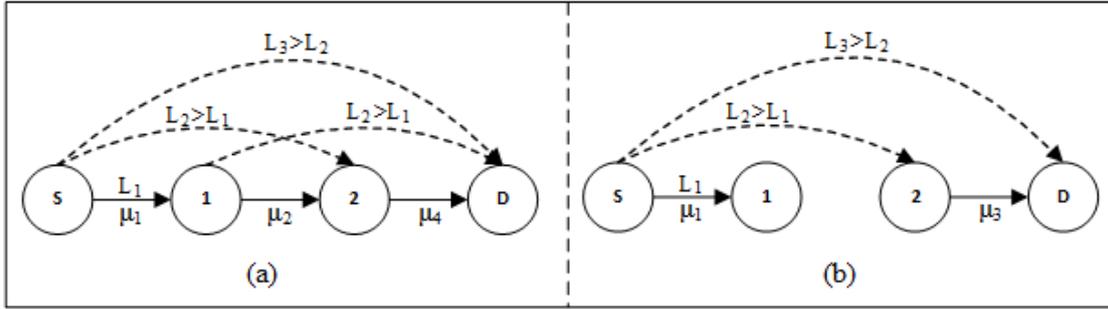


Figura 3.4: Cenário C.

$$SNR_1 = \frac{Pt*Gt*Gr}{\frac{L}{N}} \quad (12)$$

Onde SNR_1 é a relação sinal ruído na ausência de interferência.

Em seguida, substituindo a Equação (12) na Equação (7), temos Φ_1 e, utilizando a constante de proporcionalidade K já definida, temos μ_1 . Então, a capacidade do canal sem interferência para um determinado enlace é calculada por meio da Equação (13):

$$\Phi_1 = \log_2(1 + SNR_1) = \frac{\mu_1}{K} \quad (13)$$

A transmissão do nó 1 para o nó 2 ocorre com taxa μ_2 , devido à interferência do sinal de transmissão do nó S, que sofre uma atenuação $L_2 = 4L_1$, pois a distância agora é o dobro em relação à anterior e a atenuação varia com o quadrado da distância, como dado na Equação (11), ou seja a interferência nesse enlace é calculada por meio da Equação (14):

$$Pri_2 = \frac{Pt*Gt*Gr}{4*L} \quad (14)$$

Onde Pri_2 é a potência de interferência de S em 2.

Portanto, a relação sinal ruído no nó 2 é agora calculada pela Equação (15):

$$SNR_2 = \frac{\frac{Pt*Gt*Gr}{L}}{N + \left(\frac{Pt*Gt*Gr}{4*L}\right)} \quad (15)$$

Substituindo a Equação (12) na Equação 15, podemos escrever SNR_2 em função de SNR_1 , como dado pela Equação (16):

$$SNR_2 = \frac{SNR_1}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{L}{N} \right)} \quad (16)$$

Simplificando a Equação (16), obtemos então a SNR_2 , em função da SNR_1 , como:

$$SNR_2 = \frac{4*SNR_1}{4+SNR_1} \quad (17)$$

Encontrado a SNR_2 , podemos então calcular o valor da capacidade de um determinado enlace com interferência, onde a taxa de partida μ_2 é calculado pela Equação (18):

$$\Phi_2 = \log_2(1 + SNR_2) = \frac{\mu_2}{K} \quad (18)$$

Sabendo que temos valores definidos para μ_1 e SNR_1 , relacionamos as equações (13) e (18) para encontramos o valor de μ_2 em função de μ_1 , como dado pela Equação (19):

$$\mu_2 = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} * \mu_1 \quad (19)$$

O cenário para encontrarmos a relação sinal ruído para calcularmos a taxa μ_3 está representado na Figura 3.4b; é o caso onde somente os nós S e 2 estão transmitindo simultaneamente. Neste cenário, o sinal transmitido pelo nó S interfere na recepção do nó D, obrigando assim ao nó 2 transmitir com uma taxa menor. Neste caso, a relação sinal ruído no nó D pode ser calculada como:

$$SNR_3 = \frac{\frac{Pt*Gt*Gr}{L}}{N + \left(\frac{Pt*Gt*Gr}{9*L}\right)} \quad (20)$$

Repetindo os mesmos passos utilizados para encontrar a Equação (17), obtemos a SNR_3 dada pela Equação (21):

$$SNR_3 = \frac{9*SNR_1}{9+SNR_1} \quad (21)$$

Encontrado a SNR_3 , podemos então calcular o valor da taxa μ_3 , seguindo os mesmos passos utilizados para encontrar a Equação (19).

Finalmente, para calcularmos o valor da taxa μ_4 , como ilustra a Figura 3.4a, o nó D está sofrendo dupla interferência das transmissões dos nós S e 1, obrigando assim o nó 2 a transmitir com uma taxa ainda menor. A relação sinal ruído para este caso pode ser calculada pela Equação (22):

$$SNR_4 = \frac{\frac{Pt*Gt*Gr}{L}}{N + \frac{Pt*Gt*Gr}{4*L} + \frac{Pt*Gt*Gr}{9*L}} \quad (22)$$

Repetindo os mesmo passos usados para encontrar a Equação (17), obtemos então a SNR_4 dada pela Equação (23):

$$SNR_4 = \frac{36*SNR_1}{36+9*SNR_1+4*SNR_1} \quad (23)$$

Encontrado a SNR_4 , podemos então calcular o valor da taxa μ_4 , seguindo os mesmos passos utilizados anteriormente.

Com os cálculos das taxas de serviço com interferência definidos, passamos então a analisar o desempenho da rede, por meio das métricas a seguir.

a) **PROBABILIDADE DE BLOQUEIO**

A probabilidade de bloqueio é a soma das probabilidades em regime estacionário de todos os estados onde o primeiro servidor não tem mais espaço para receber um novo pacote. Essa métrica de desempenho, é calculada pela Equação (24):

$$P = \sum_{x \in S} \pi(x), \text{ Se } (i + wi) = 1 \quad (24)$$

Onde P representa probabilidade de bloqueio, $\pi(x)$ é a probabilidade do estado x da cadeia e $(i + wi) = 1$ quer dizer que nesse estado não é possível a entrada de um novo pacote na rede.

A Figura 3.5 mostra as probabilidades de bloqueio dos três modos de operação da rede com diferentes SNRs. Observa-se que o modo A[Full,Omni] apresenta a maior probabilidade de bloqueio no cenário com $SNR_1=10$, seguido dos cenários com $SNR_1=50$ e $SNR_1=100$ do mesmo modo, com uma probabilidade de bloqueio similar. O modo C[Full,Direc] com $SNR_1=100$ apresenta a menor probabilidade de bloqueio, isso porque este modo apresenta maior disponibilidade de transmissão comparado com os outros dois modos. Como era de se esperar, podemos perceber também em cada modo que quanto maior for a SNR_1 menor será a probabilidade de bloqueio.

As figuras 3.6, 3.7 e 3.8 mostram a comparação da probabilidade de bloqueio do modelo proposto nesta dissertação, que passaremos a chamar de “*modelo com interferência*” (por ex. B[Half,Direc] $SNR_1=10$), com o modelo proposto em [31], que

passaremos a chamar de “*modelo sem interferência*”, que nas figuras são representados sem a SNR_1 (por ex. B[Half,Dirac]). Como esperado, os modos do modelo sem interferência apresentam menor probabilidade de bloqueio em todos os três cenários comparados com os modos do modelo com interferência. A análise considerando a interferência é mais precisa e realista do que a análise sem interferência.

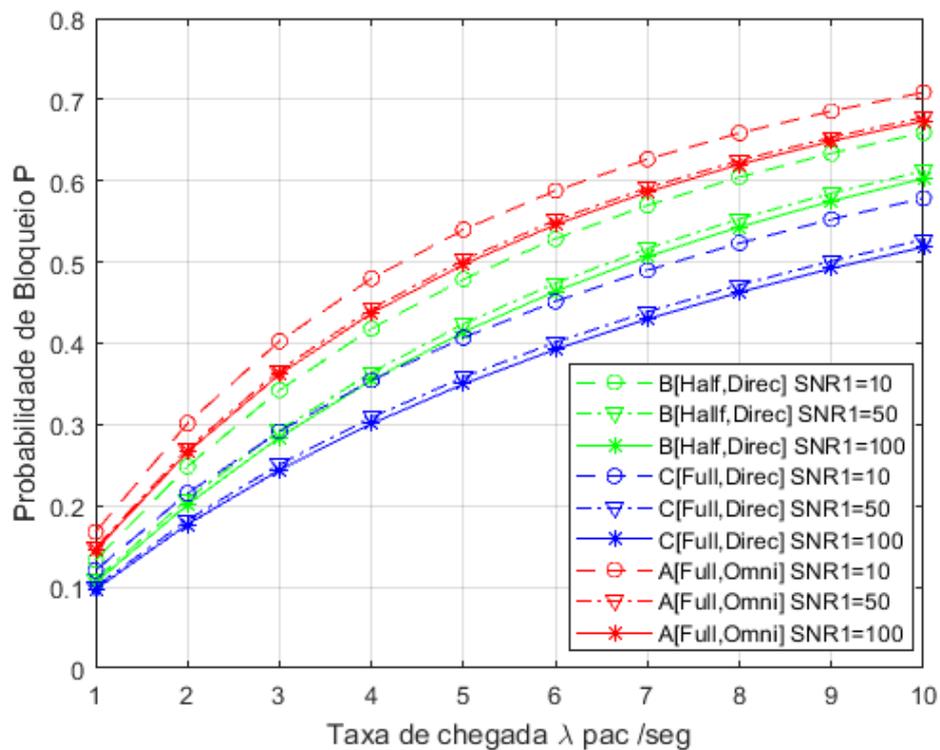


Figura 3.5: Probabilidade de bloqueio.

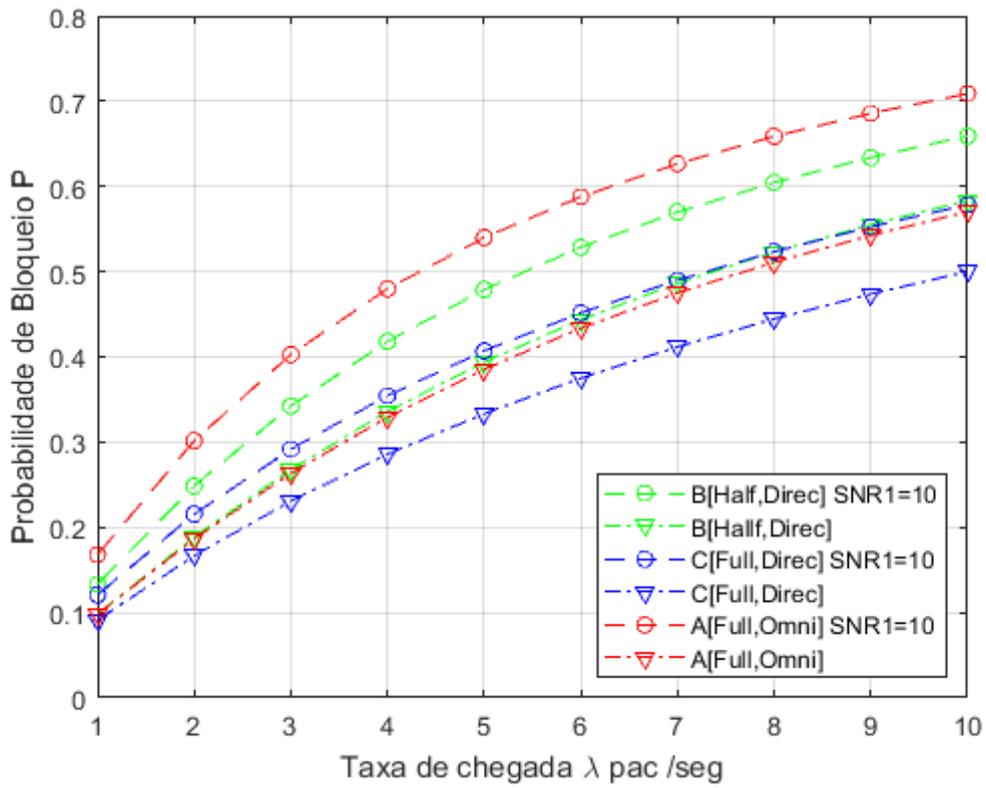


Figura 3.6: Probabilidade de bloqueio com SNR=10.

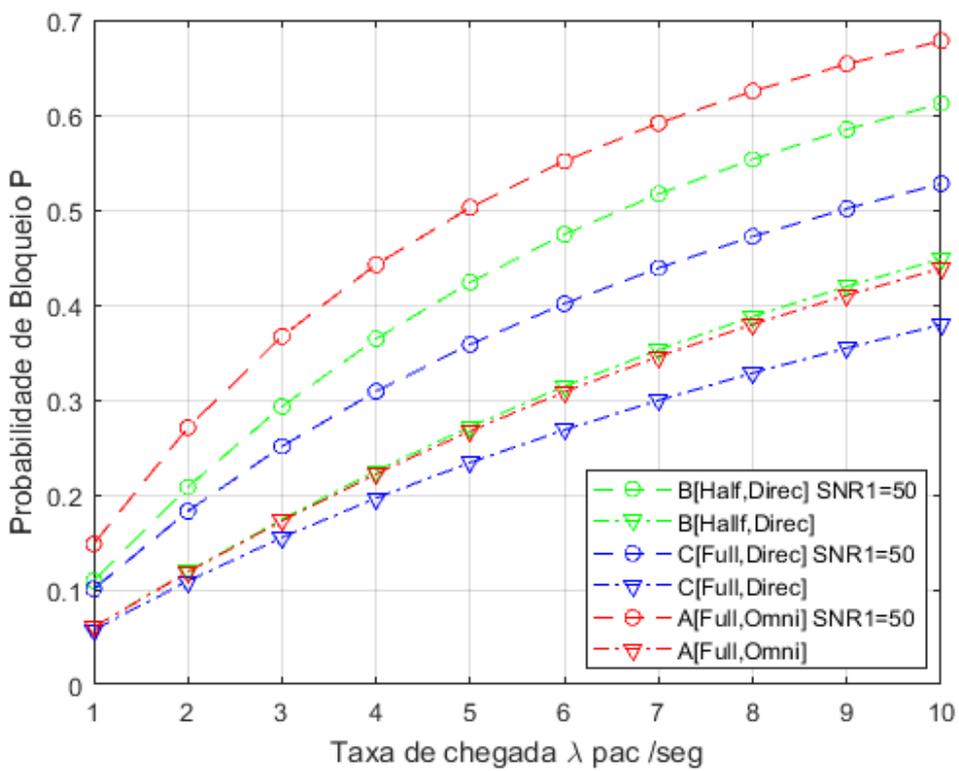


Figura 3.7: Probabilidade de bloqueio com SNR=50.

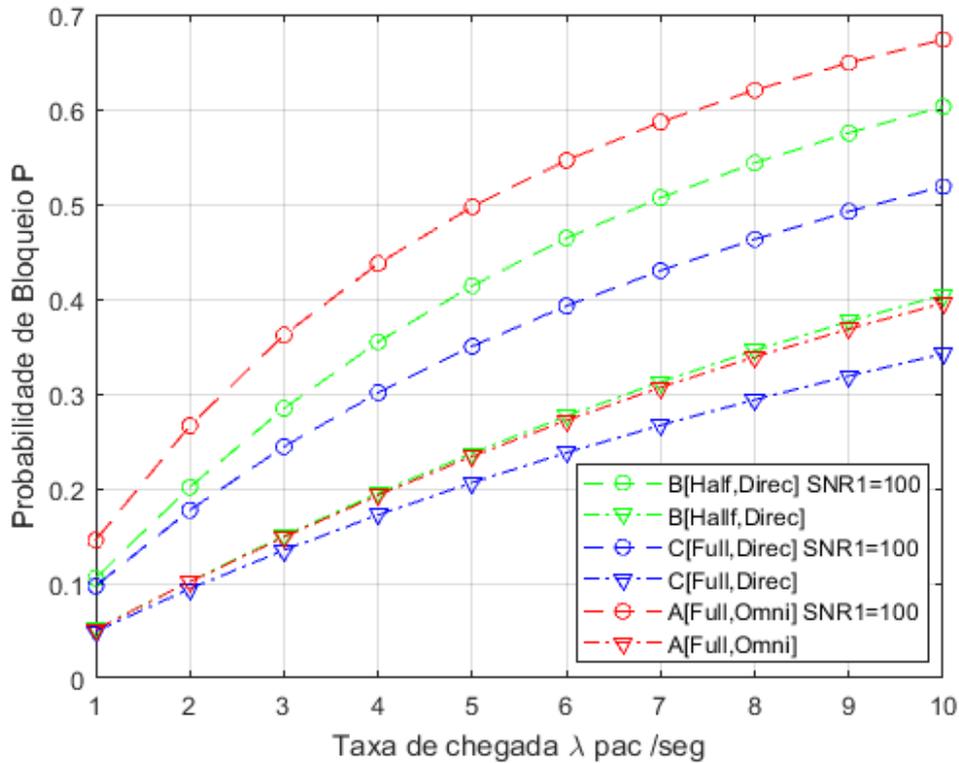


Figura 3.8: Probabilidade de bloqueio com SNR = 100.

b) CAPACIDADE

Capacidade do sistema é a taxa média de transmissões efetuadas com sucesso por unidade de tempo, onde uma transmissão com sucesso acontece quando o pacote é transmitido pelo último servidor para o nó de destino. Essa métrica de desempenho é calculada por meio da Equação (25):

$$C = \sum_{x \in S} \pi(x) \gamma, \quad (25)$$

$$\text{Onde } \gamma = \begin{cases} \mu_1, se & k = 1 \\ \mu_2, se & j = 1 e k = 1 \\ \mu_3, se & i = 1 e k = 1 \\ \mu_4, se & i = 1, j = 1 e k = 1 \end{cases} e$$

$k = 1$ significa que nesse estado o servidor k está transmitindo para o destino e μ_1 representa a taxa de partida sem interferência; μ_2 é a taxa de partida na presença de interferência quando os servidores j e k estiverem transmitindo simultaneamente ($j = 1$ e $k = 1$); μ_3 é a taxa de partida na presença de interferência quando os nós i e k estiverem transmitindo ao mesmo tempo; e μ_4 é a taxa de partida com interferência quando os nós i, j e k estiverem transmitindo simultaneamente.

A Figura 3.9 mostra que, dentre todos os modos, o modo B[Half,Direc] com $SNR_1=100$ tem a maior capacidade, logo a seguir aparece o mesmo modo nos cenários com $SNR_1=50$ e 10, logo depois, aparece o modo C[Full,Direc] com $SNR_1=100$, logo a seguir vem os cenários com $SNR_1=50$ e 10 deste mesmo modo. O modo A[Full,Omni] com $SNR_1=10$ têm a menor capacidade. Podemos perceber aqui, que a capacidade aumenta com o aumento da SNR_1 , ou seja quando maior for a SNR , maior será a capacidade.

A Figura 3.10, apresenta a comparação da capacidade entre os modos do modelo com interferência em cenários com $SNR_1=10$, com os modos do modelo sem interferência proposto em [31]. O modo B[Half,Direc] sem interferência, tem a maior capacidade, como esperado, seguido do modo C[Full,Direc] sem interferência, logo após aparecem os modos B[Half,Direc] com interferência; o modo A[Full,Omni] com interferência tem a menor capacidade. As figuras 3.11 e 3.12 mostram a capacidade para os cenários com $SNR_1=50$ e $SNR_1=100$ respectivamente. Nessas figuras podemos observar que o modo B[Half,Direc] sem interferência continua tendo a maior capacidade, e o modo A[Full,Omni] com interferência tem a menor capacidade.

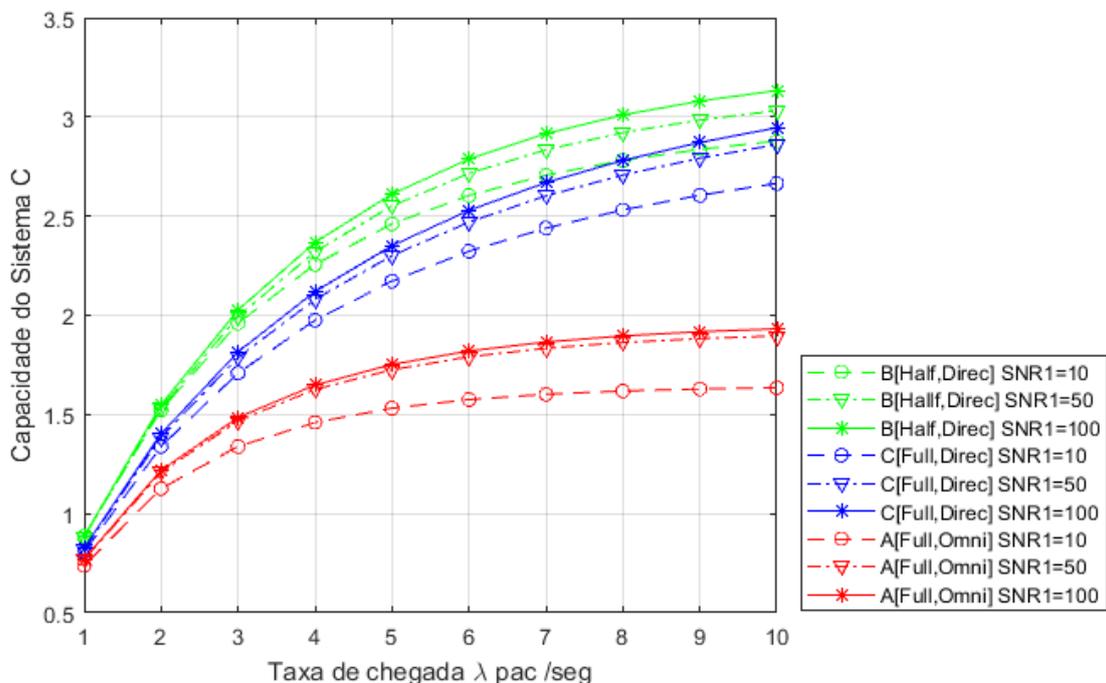


Figura 3.9: Capacidade do Sistema.

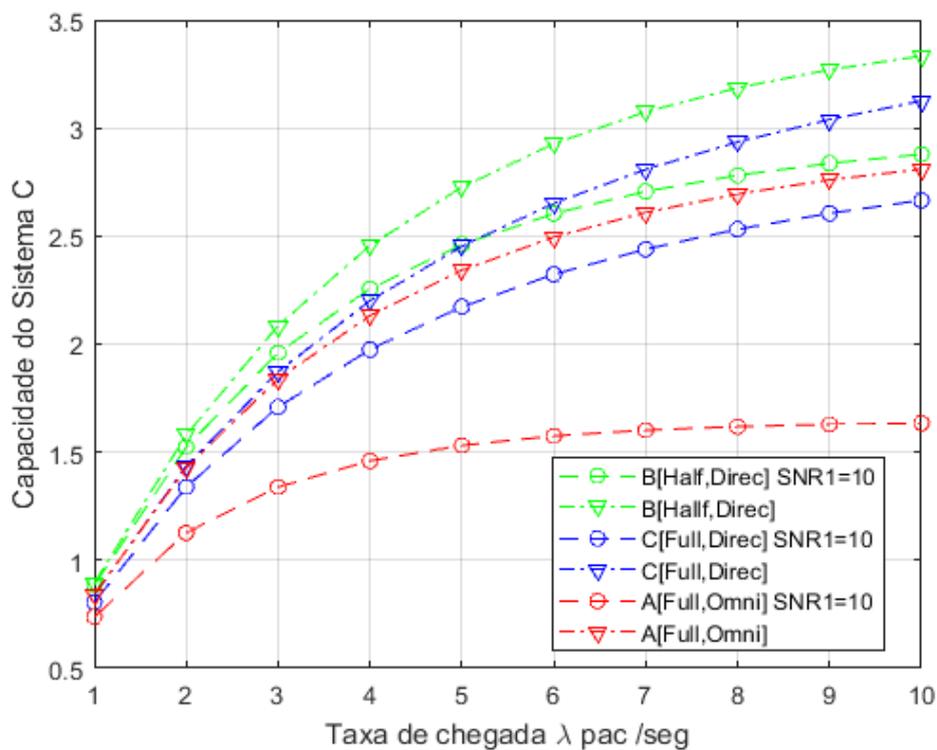


Figura 3.10: Capacidade do Sistema com SNR = 10.

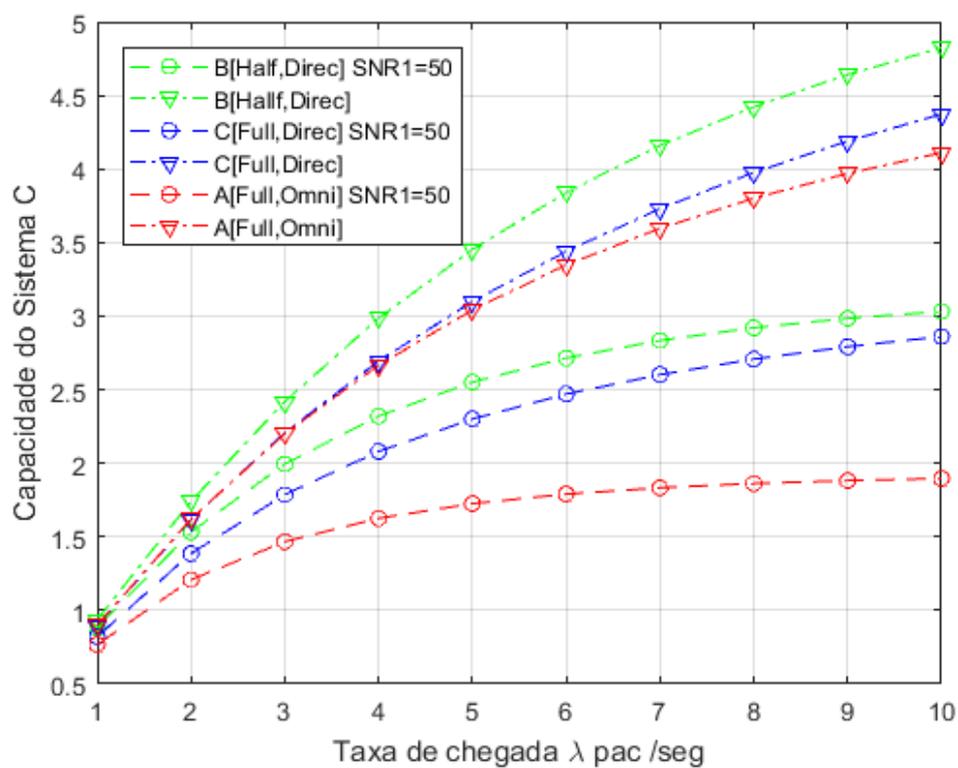


Figura 3.11: Capacidade do Sistema com SNR = 50.

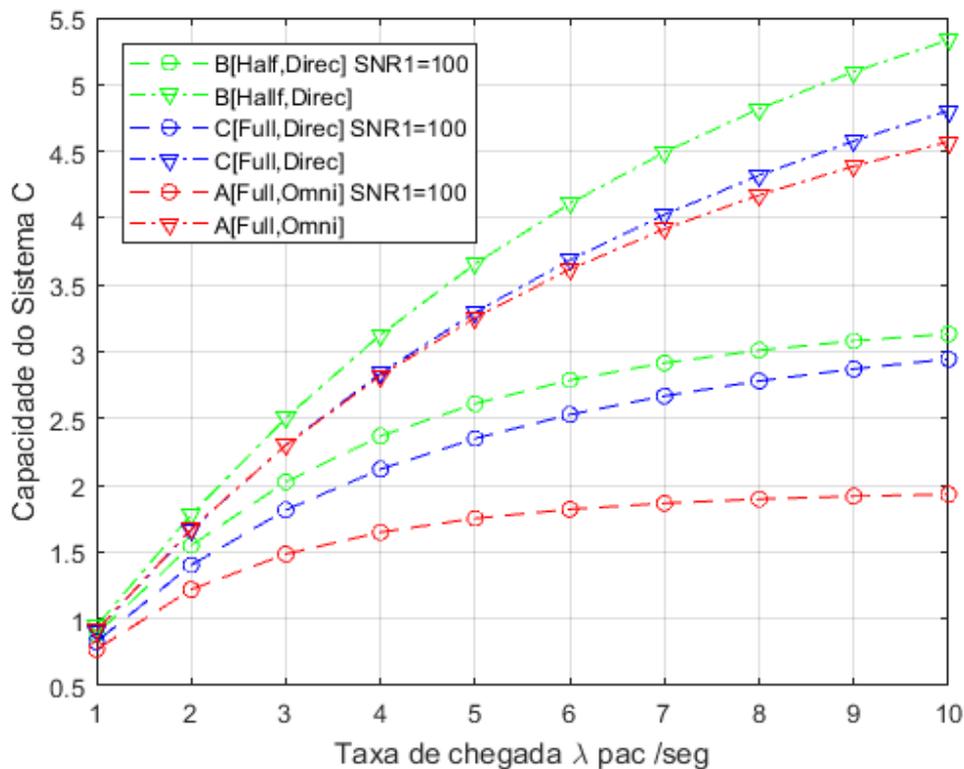


Figura 3.12: Capacidade do Sistema com SNR = 100.

c) PROBABILIDADE DE DESCARTE

A probabilidade de descarte é a probabilidade de um pacote entrar no sistema e ser descartado antes de chegar no nó de destino. Essa métrica de desempenho é calculada através da Equação (26):

$$PD = 1 - PS \quad (26)$$

Onde, PD representa a probabilidade de descarte e PS a probabilidade de um pacote que entrou no sistema ser transmitido até o nó de destino com sucesso. Assim, PS é calculada pela razão entre a capacidade do sistema C e a taxa média de pacotes que entram na rede, expressa por:

$$PS = C/\lambda(1 - P) \quad (27)$$

A Figura 3.13, apresenta as probabilidades de descarte do modelo com interferência dos distintos modos de operação e cenários, onde podemos observar que os modos C[Full, Direc] e A[Full, Omni], ambos com SNR₁=10, têm a maior probabilidade de descarte, seguidos do modo C[Full, Direc] com SNR₁=50 e SNR₁=100.

O modo B[Half,Direc] com $SNR_1=100$ é o que tem a menor probabilidade de descarte dentre todos os outros. Note que os modos que utilizam a tecnologia de transmissão *full duplex* têm maior descarte em relação ao modo que utiliza *half duplex*, ou seja, por falta de buffer no sistema, os nós *full duplex* tendem a descartar mais pacotes porque quando um pacote é recebido em um determinado servidor enquanto o mesmo está transmitindo outro pacote, o pacote recebido é descartado. As figuras 3.14, 3.15 e 3.16 mostram a comparação da probabilidade de descarte entre os modelos sem e com interferência. Nos três cenários, observa-se que o modo B[Half,Direc] sem interferência apresenta a menor probabilidade de descarte, como esperado. Os modos C[Full,Direc] e A[Full,Omni] com interferência têm as maiores probabilidades de descarte.

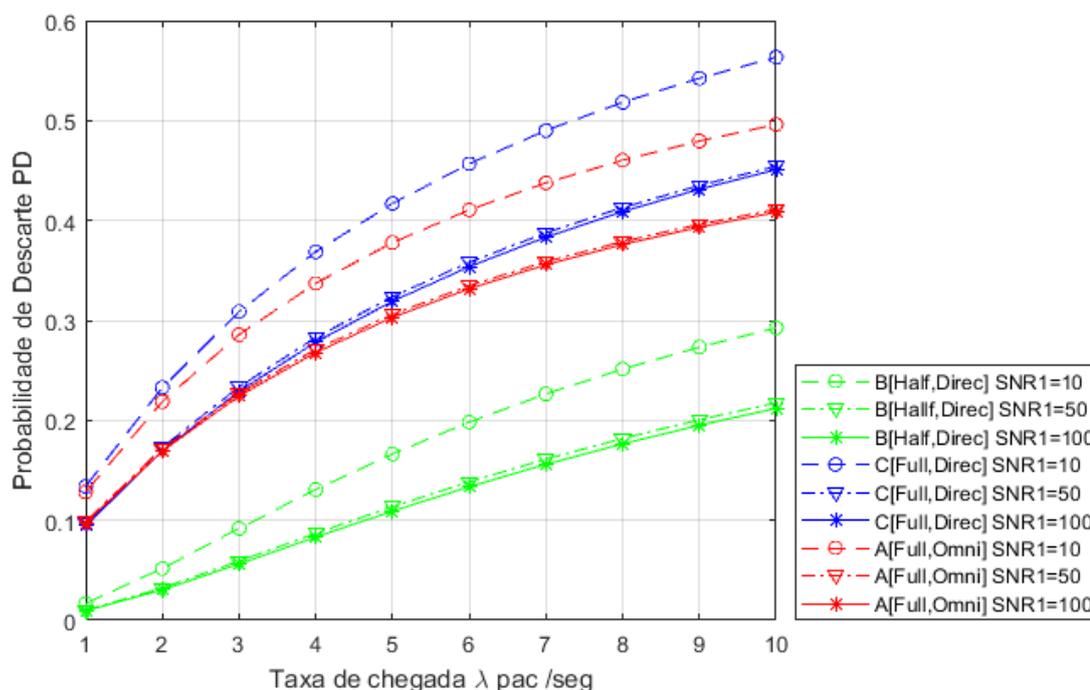


Figura 3.13: Probabilidade de Descarte.

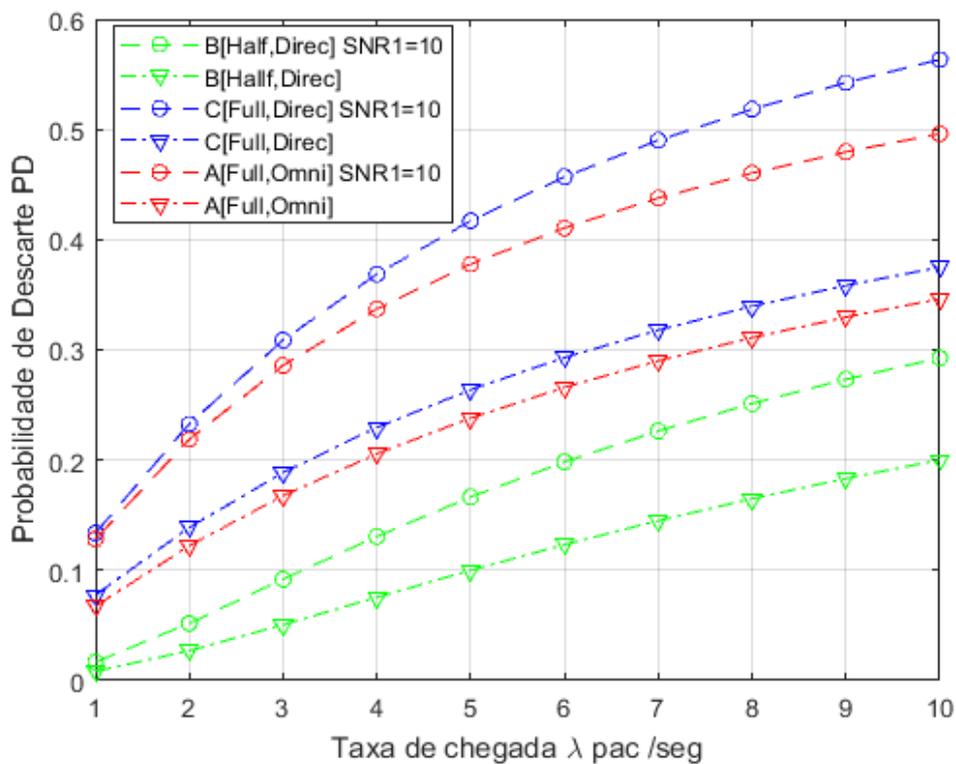


Figura 3.14: Probabilidade de Descarte com SNR = 10.

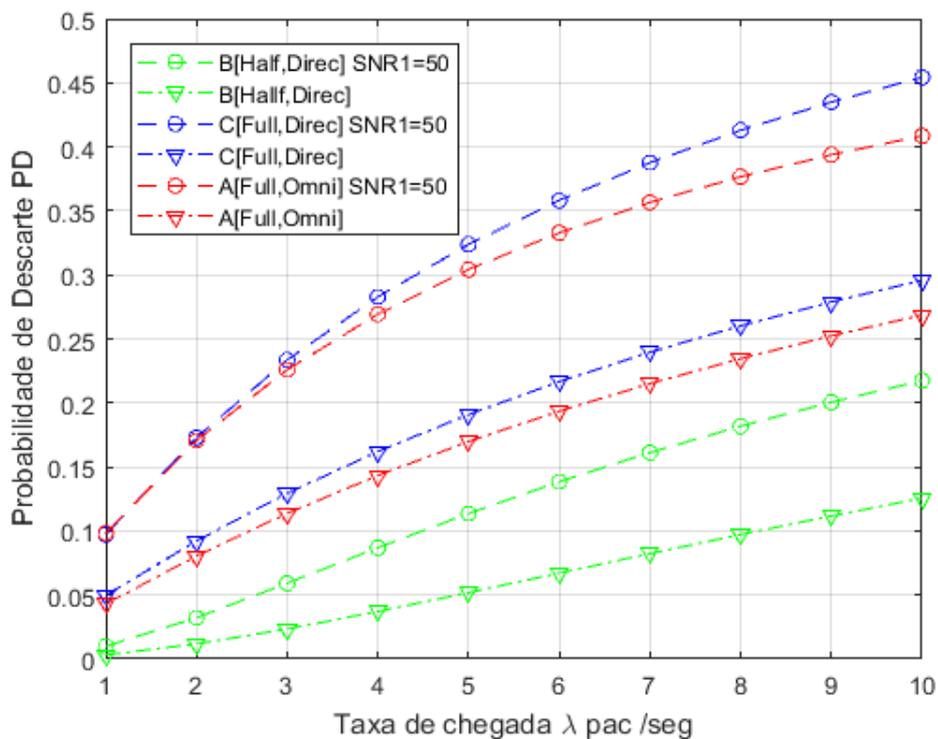


Figura 3.15: Probabilidade de Descarte com SNR = 50.

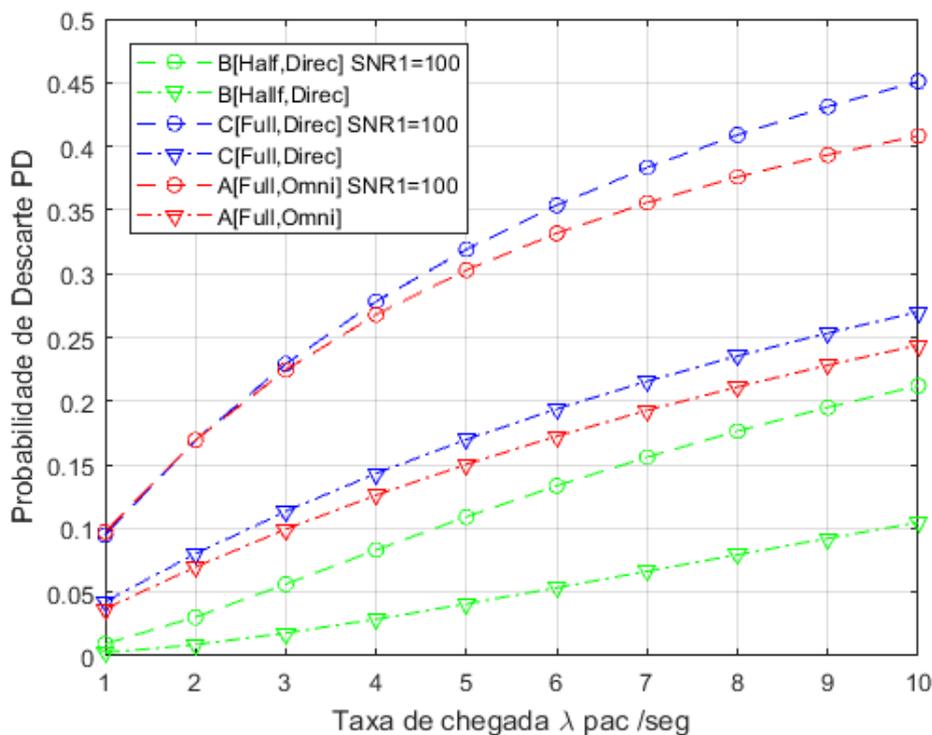


Figura 3.16: Probabilidade de Descarte com SNR = 100.

d) VAZÃO

A vazão é a relação entre a capacidade do sistema, C , e a taxa total de chegada de pacotes no sistema. Essa métrica é calculada por meio da Equação (28):

$$Vazão = C/\lambda \quad (28)$$

A Figura 3.17 mostra a vazão de todos os modos de operação da rede do modelo com interferência. Observa-se que o modo B[Half,Direc], com $SNR_1=100$, $SNR_1=50$ e $SNR_1=10$, apresenta a melhor vazão em relação aos outros modos, isso acontece porque a capacidade desse modo nos três cenários é superior aos cenários dos modos A[Full,Omn] e C[Full,Direc]. Em seguida vem o modo C[Full,Direc] com $SNR_1=100$. O modo com a menor vazão é o modo A[Full,Omn] com $SNR_1=10$. Observa-se também que, como na capacidade, a vazão aumenta com o aumento da SNR_1 . As figuras 3.18, 3.19 e 3.20, mostram a comparação da vazão entre os modelos com e sem interferência. Como esperado, nas três figuras citadas acima, observa-se que para os três modos o modelo sem interferência tem a maior vazão, assim como na capacidade.

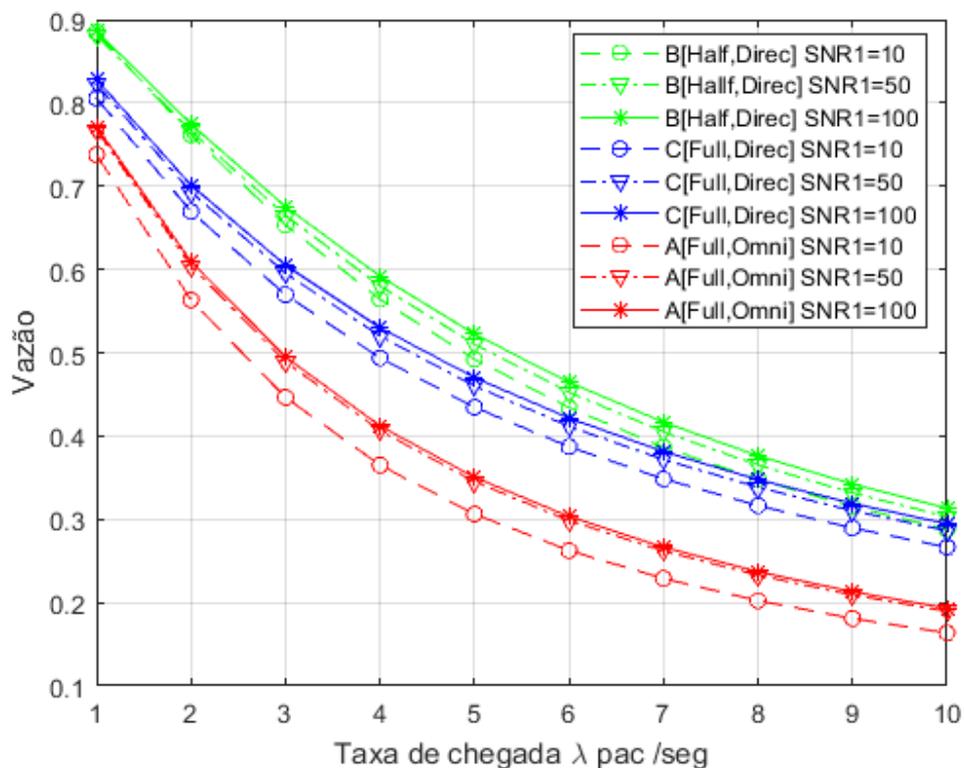


Figura 3.17: Vazão.

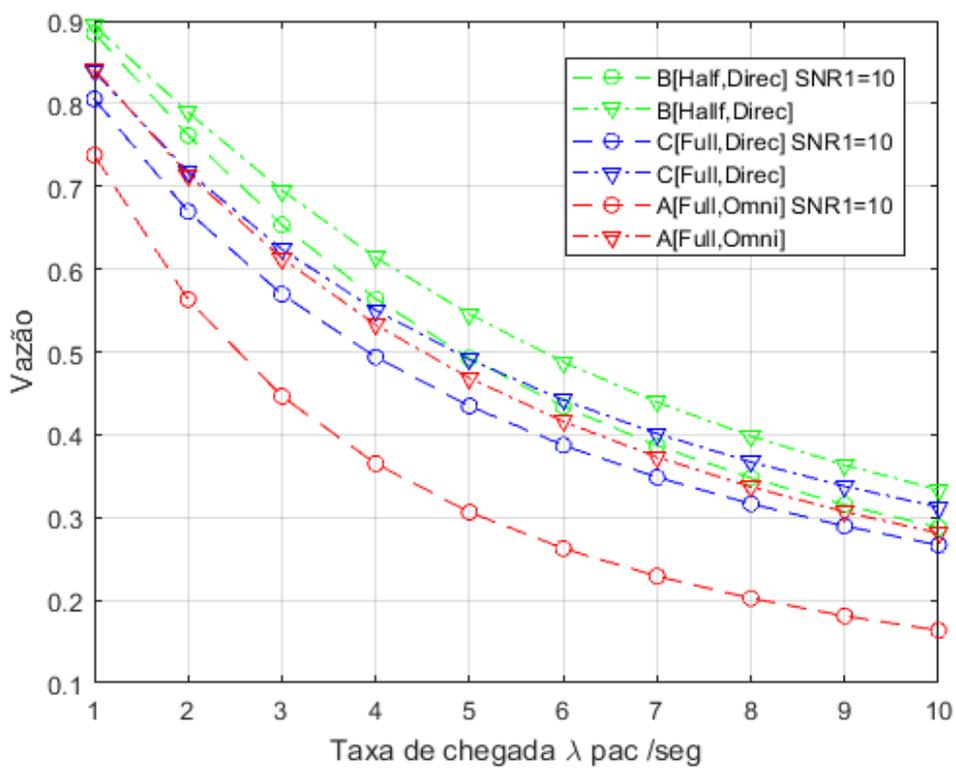


Figura 3.18: Vazão com SNR = 10.

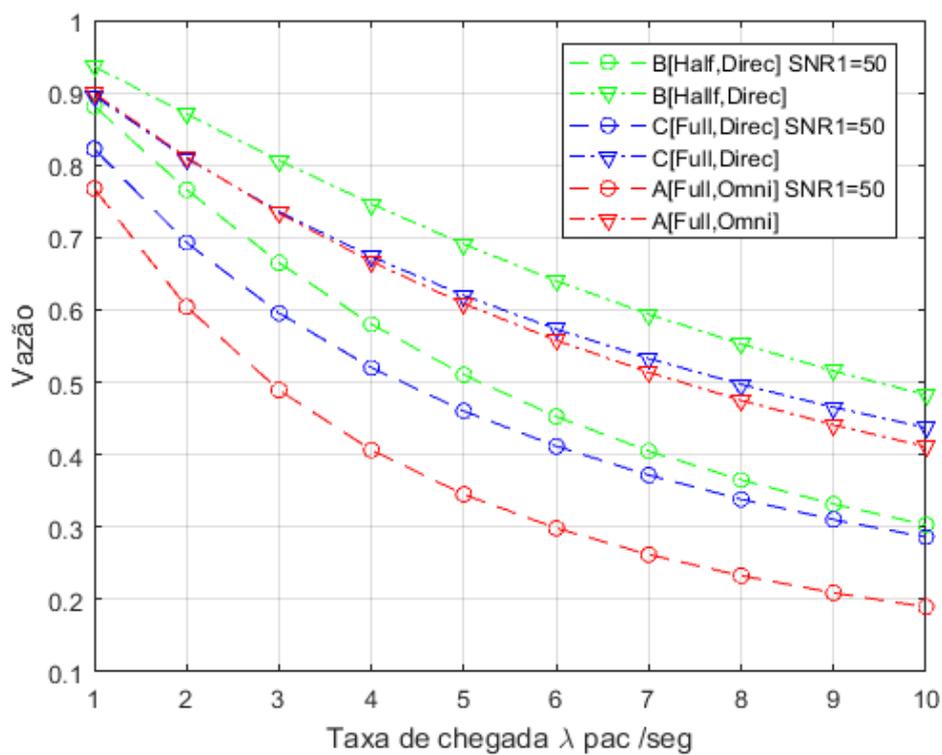


Figura 3.19: Vazão com SNR = 50.

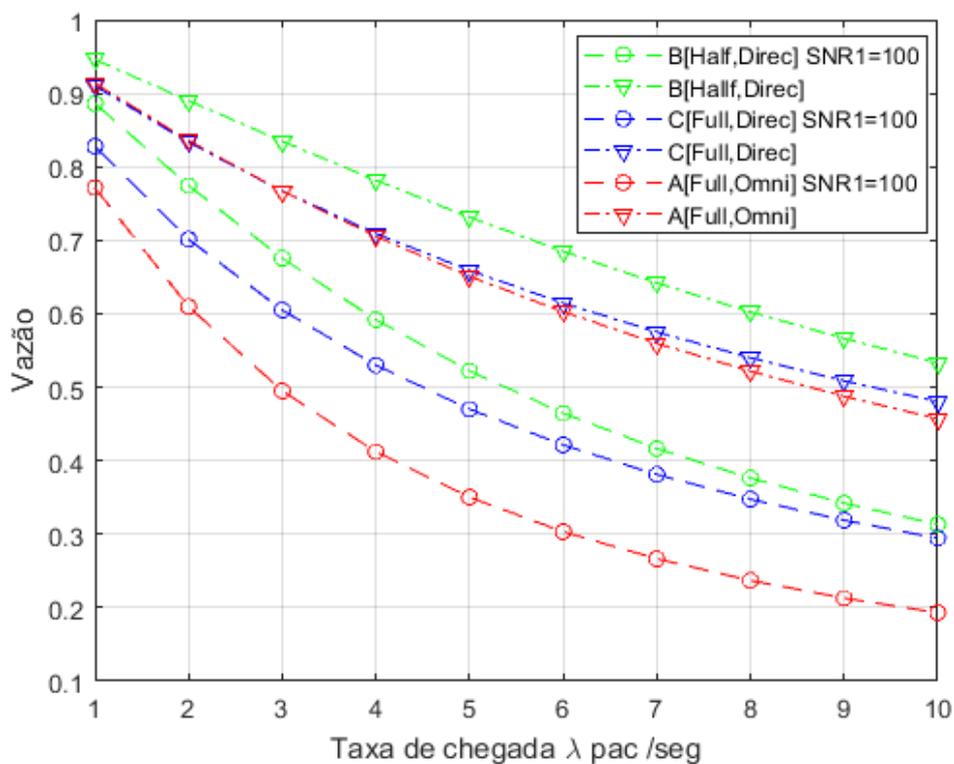


Figura 3.20: Vazão com SNR = 100.

e) NUMÉRO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA

O número médio de elementos no sistema é dado pela Equação (29):

$$Eq = \sum_{x \in S} \pi(x) N(x) \quad (29)$$

Onde Eq representa o número médio de elementos no sistema, $\pi(x)$ é a probabilidade em regime permanente do estado x da cadeia e $N(x) = i + wi + j + wj + k + wk$ representa o número de pacotes no sistema em cada estado.

A Figura 3.21 mostra que os modos que utilizam a tecnologia de transmissão *half duplex* têm maior número médio de elementos no sistema comparado com os modos que utilizam a transmissão *full duplex*. Podemos observar também que quanto maior é a relação sinal ruído menor será o número de elementos no sistema, como esperado. Na comparação entre o modelo sem interferência e o nosso modelo, onde levamos em conta a interferência, pode-se observar, nas figuras 3.22, 3.23 e 3.24, que os três modos do modelo sem interferência têm menor número de elementos no sistema em relação aos modos com interferência.

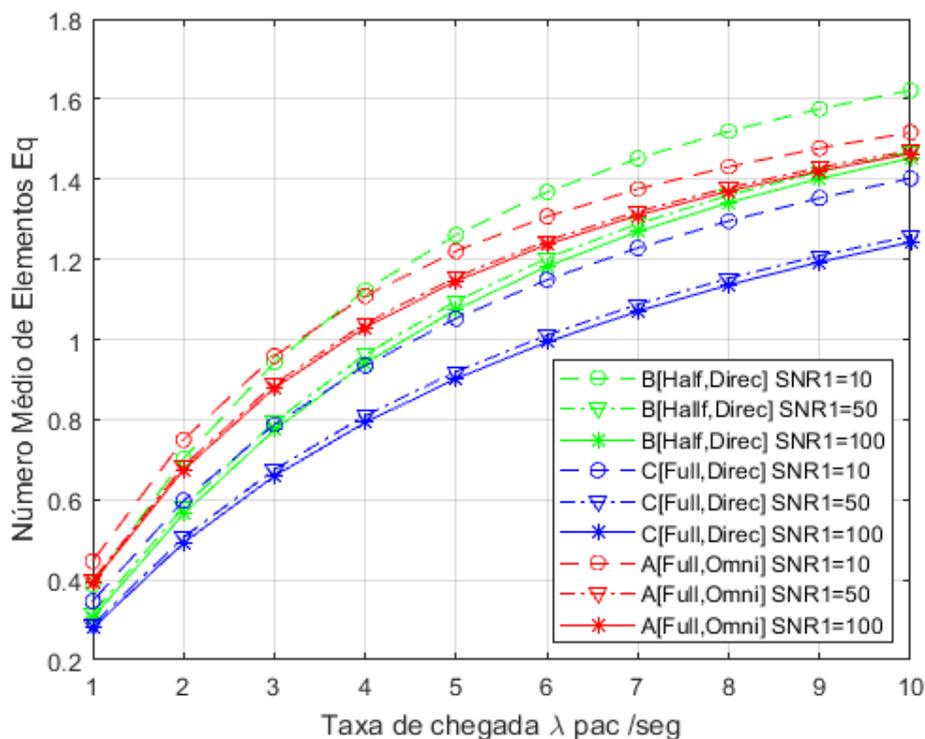


Figura 3.21: Número médio de elementos no sistema.

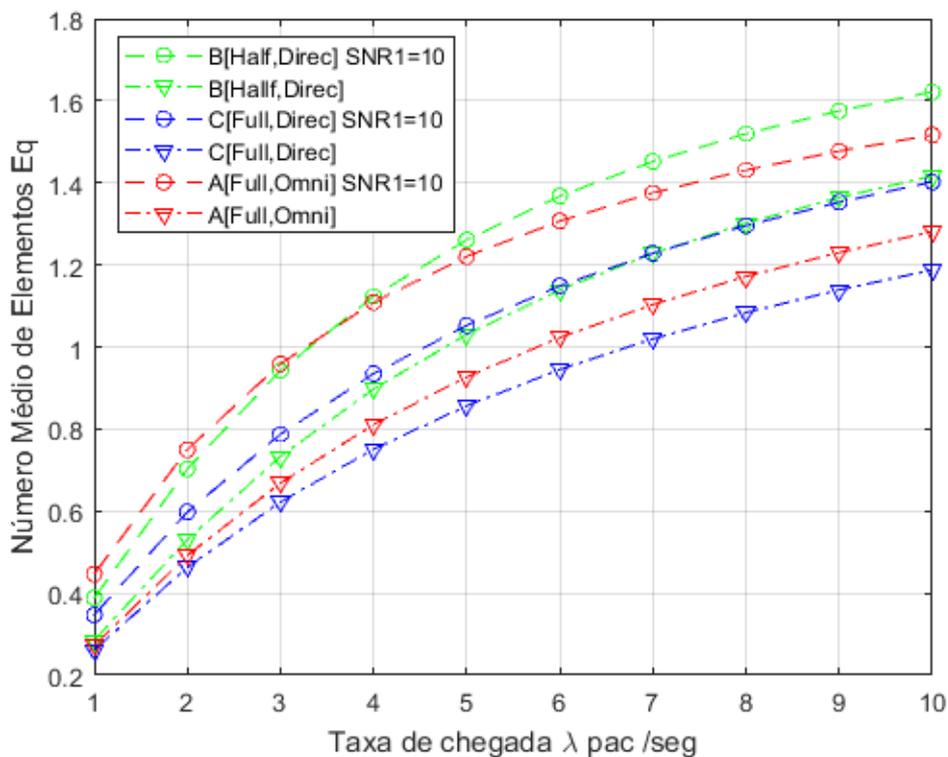


Figura 3.22: Número médio de elementos no sistema com SNR = 10.

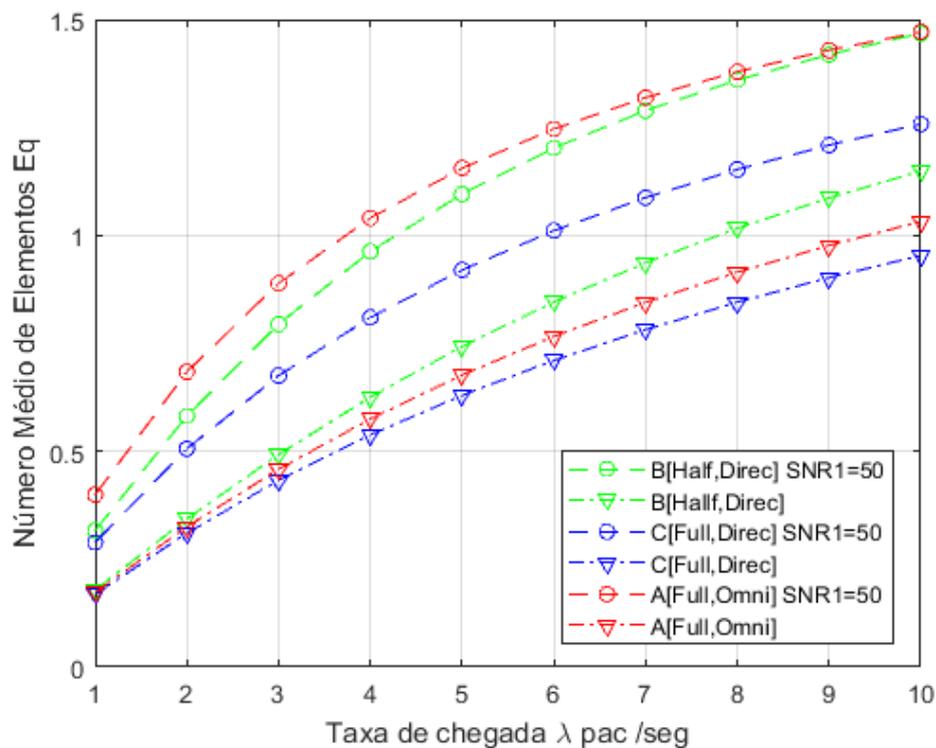


Figura 3.23: Número médio de elementos no sistema com SNR = 50.

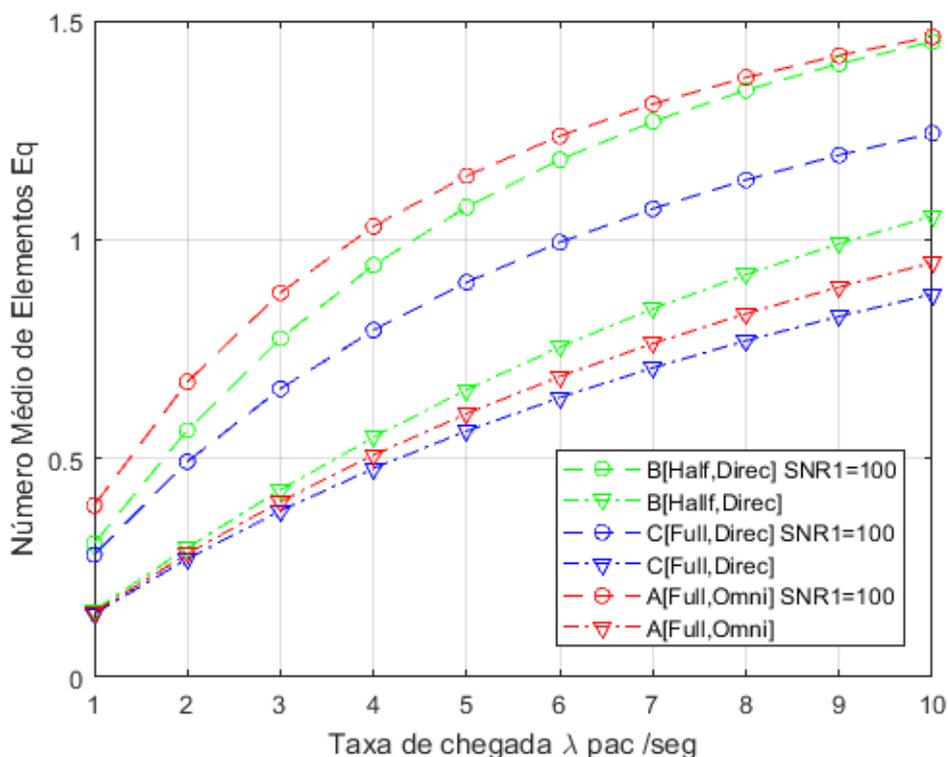


Figura 3.24: Número médio de elementos no sistema com SNR = 100.

3.5 CONCLUSÃO PARCIAL DO CAPÍTULO

Neste Capítulo apresentou-se a análise de desempenho da rede sem fio *multi-hop full duplex* levando em conta a interferência, utilizando uma cadeia de Markov de tempo contínuo que modela o sistema. O cenário considerado neste capítulo é aquele em que os nós não possuem buffer. Diversas métricas de desempenho foram utilizadas para caracterizar o desempenho de cada modo. Com base nas análises realizadas podemos concluir que o modo B[Half, Direc] com $SNR_1=100$, tem o melhor desempenho em termos de capacidade e vazão. Isso ocorre porque os modos que utilizam comunicação *full duplex* apresentam uma probabilidade de descarte superior ao modo que utiliza *half duplex*, pois a tecnologia *full duplex* permite o envio e recepção simultânea de pacotes e, como não há buffer nos servidores, quando há uma recepção no servidor enquanto o mesmo servidor está a transmitir, o pacote recebido é descartado, afetando negativamente o desempenho desses modos nesse modelo. Por outro lado, em termos de probabilidade de bloqueio, o modo C[Full, Direc] com $SNR_1=100$ tem o melhor desempenho, ou seja, podemos dizer que os modos que utilizam *full duplex* combinados

com antenas direcionais permitem a entrada na rede de um número maior de pacotes, o que nos leva a concluir que estes modos podem ter melhor desempenho também nos demais parâmetros se os nós da rede possuírem *buffer*. Em cada modo, como esperado, o desempenho aumenta com o aumento da relação SNR. Por fim, percebe-se que há diferença significativa nos resultados quando se compara os modelos com e sem interferência, indicando a maior precisão do modelo em que a interferência é considerada.

CAPÍTULO 4: MODELO COM BUFFER

Neste capítulo será analisada a rede sem fio *multi-hop full duplex* considerando a interferência e a presença de *buffer* nos servidores.

Os modos de operação da rede do modelo com buffer continuam a funcionar conforme as mesmas regras apresentadas e usadas no modelo sem *buffer* descritos anteriormente, a diferença é que no modelo com buffer, em um dado servidor, podem estar vários pacotes, sendo o número de pacotes limitado ao tamanho do *buffer*. Por causa da existência de *buffer*, pode haver situações em que um servidor tenha muitos pacotes para transmitir. Portanto, a fim de evitar que um servidor monopolize a rede nos casos em que dois servidores não possam transmitir simultaneamente e tenham pacotes para transmitir, admite-se que os servidores alternam o direito de transmissão, com cada servidor transmitindo um pacote e cedendo o direito de transmissão para o outro servidor. Admite-se ainda que este processo é controlado através de um protocolo de múltiplo acesso.

Nas próximas seções apresentam-se os modos de operação e os diagramas de transição de estados para este modelo.

4.1 MODO A[FULL, OMNI]

Neste modo de operação, todos os servidores precisam de *buffer*, denotado por b . Aqui, somente dois servidores podem transmitir simultaneamente, nomeadamente os servidores i e j e os servidores j e k . Já os servidores i e k não podem transmitir ao mesmo tempo. Assim sendo, sempre que um deles transmitir um pacote, dá prioridade ao outro para transmitir também um pacote, caso este tenha pacotes para transmitir. Para este modo, o conjunto de estados fica definido da seguinte maneira:

$$S = \{x \mid 0 \leq i, j, k \leq 1; i+j+k \leq 2; i+k \leq 1; 0 \leq w_i, w_j, w_k \leq b; i+w_i \leq b+1; j+w_j \leq b+1; k+w_k \leq b+1\} \quad (29)$$

4.1.1 DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS

Abaixo descrevemos todas as possíveis transições para este modo de operação, com tamanho do *buffer*, b , variável. O estado inicial corresponde a $i = w_i = j = w_j = k = w_k = 0$. Assim sendo temos:

a) Dado um estado $i(wi), j(wj), k(wk)$, a chegada de um pacote no nó S que ocorre com taxa λ , leva o sistema para dois estados possíveis:

a1. $i + 1(wi), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 0, wi = 0, j \leq 1, wj \leq b, k = 0, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 com taxa μ_1 , e o pacote que chega no nó S começa a ser transmitido para o nó 1 com taxa μ_1 . Perceba que se o nó 1 estiver transmitindo para o nó 2, a mudança de estado fará com que a taxa de transmissão de 1 para 2 reduza para μ_2 , devido à interferência da transmissão do nó S no nó 2.

a2. $i(wi + 1), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi < b, j \leq 1, wj \leq b, k = 0, wk \leq b$, ou seja, o nó S está transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , já o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 , devido a interferência da transmissão do nó S no nó 2. O pacote que chega é colocado em espera no nó S.

ou

- $i = 0, wi < b, j \leq 1, wj \leq b, k = 1, wk \leq b$, ou seja, o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_1 , se $j < 1$, ou o nó 2 está transmitindo com taxa μ_2 , com interferência, se $j = 1$. O nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 com taxa μ_1 . O pacote que chega é colocado em espera no nó S.

b) A transmissão de um pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ_1 , leva o sistema para nove estados possíveis:

b1. $i - 1(wi), j + 1(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi = 0, j = 0, wj = 0, k = 0, wk \leq b$, ou seja, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída e o pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2 com taxa μ_1 .

b2. $i(wi - 1), j + 1(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi > 0, j = 0, wj = 0, k = 0, wk \leq b$, ou seja, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída e o nó S retira outro pacote do *buffer* e começa a transmitir para o nó 1; o primeiro pacote transmitido de

S para 1 começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2 com taxa μ_2 , com interferência.

b3. $i - 1(wi), j = 1(wj + 1), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi = 0, j = 1, wj < b, k = 0, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 está transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 , a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída e o pacote é colocado em espera no nó 1.

b4. $i(wi - 1), j(wj + 1), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi > 0, j = 1, wj < 0, k = 0, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 está transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 , a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída e o pacote é colocado em espera no nó 1, o nó S retira um pacote em espera e o transmite para o nó 1 com taxa μ_1 .

b5. $i - 1(wi), j + 1(wj), k + 1(wk - 1)$, Se:

- $i = 1, wi \leq b, j = 0, wj = 0, k = 0, wk < b$, ou seja, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída, o pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2 com taxa μ_1 e o nó 2 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o destino com taxa μ_2 .

b6. $i - 1(wi), j(wj + 1), k + 1(wk - 1)$, Se:

- $i = 1, wi \leq b, j = 1, wj < b, k = 0, wk > 0$, ou seja, o nó 1 está transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 , a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso e o pacote é colocado em espera no nó 1, o nó 2 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o destino com taxa μ_2 .

b7. $i - 1(wi), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi = 0, j = 1, wj = b, k = 0, wk \leq b$, ou seja, a transmissão do nó S para o nó 1 que ocorre com taxa μ_1 é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 1, isto porque o seu *buffer* está cheio.

b8. $i(wi - 1), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi > 0, j = 1, wj = b, k = 0, wk \leq b$, ou seja, a transmissão do nó S para o nó 1 que ocorre com taxa μ_1 é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 1, isto porque o seu *buffer* está cheio, e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1 com taxa μ_1 .

b9. $i - 1(wi), j(wj), k + 1(wk - 1)$, Se:

- $i = 1, wi \leq b, j = 1, wj = b, k = 0, wk > 0$, ou seja, a transmissão do nó S para o nó 1 que ocorre com taxa μ_1 é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 1, pois o seu *buffer* está cheio, e o nó 2 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o destino com taxa μ_2 .

c) A transmissão de um pacote do nó 1 para o nó 2 que ocorre com taxa μ_1 sem interferência, leva o sistema para seis estados possíveis:

c1. $i(wi), j - 1(wj), k + 1(wk)$, Se:

- $i = 0, wi = 0, j = 1, wj = 0, k = 0, wk \leq b$, ou seja, a transmissão do nó 1 para o nó 2 que ocorre com taxa μ_1 é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido para o destino com taxa μ_1 .

c2. $i(wi), j - 1(wj), k(wk + 1)$, Se:

- $i = 1, wi \leq b, j = 1, wj = 0, k = 0, wk < b$, ou seja, o nó S está transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , a transmissão do nó 1 para o nó 2 que ocorre com taxa μ_2 é concluída com sucesso e o pacote é colocado em espera no nó 2, ou
- $i = 0, wi \leq b, j = 1, wj = 0, k = 1, wk < b$, ou seja, o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_2 , o nó 1 conclui sua transmissão para o nó 2 com taxa μ_1 , e o pacote é colocado em espera no nó 2.

c3. $i(wi), j(wj - 1), k + 1(wk)$, Se:

- $i = 0, wi = 0, j = 1, wj > 0, k = 0, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 conclui sua transmissão para o nó 2 com taxa μ_1 , e o pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o destino com taxa μ_2 , o nó 1 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 2 com taxa μ_1 .

c4. $i(wi), j(wj - 1), k(wk + 1)$, Se:

- $i = 1, wi \leq b, j = 1, wj > 0, k = 0, wk < b$, ou seja, o nó S está transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , o nó 1 conclui sua transmissão para o nó 2 com taxa μ_2 , e o pacote é colocado em espera no nó 2, o nó 1 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 2, Ou,

- $i = 0, w_i \leq b, j = 1, w_j > 0, k = 1, w_k < b$, ou seja, o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_2 , o nó 1 conclui sua transmissão para o nó 2 com taxa μ_1 , e o pacote é colocado em espera no nó 2, o nó 1 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 2.

c5. $i(w_i), j - 1(w_j), k(w_k)$, Se:

- $i = 1, w_i \leq b, j = 1, w_j = 0, k = 0, w_k = b$, ou seja, o nó S está transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , a transmissão do nó 1 para o nó 2 que ocorre com taxa μ_2 é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 2, pois seu *buffer* está cheio, ou,
- $i = 0, w_i \leq b, j = 1, w_j = 0, k = 1, w_k = b$, ou seja, o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_2 , o nó 1 conclui sem sucesso sua transmissão para o nó 2 com taxa μ_1 , pois seu *buffer* está cheio.

c6. $i(w_i), j(w_j - 1), k(w_k)$, Se:

- $i = 1, w_i \leq b, j = 1, w_j > 0, k = 0, w_k = b$, ou seja, o nó S está transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , a transmissão do nó 1 para o nó 2 que ocorre com taxa μ_2 é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 2, pois seu *buffer* está cheio e o nó 1 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 2, ou
- $i = 0, w_i \leq b, j = 1, w_j > 0, k = 1, w_k = b$, ou seja, o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_2 , o nó 1 conclui sem sucesso sua transmissão para o nó 2 com taxa μ_1 , o pacote é descartado no nó 2, pois seu *buffer* está cheio, o nó 1 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 2.

d) A transmissão de um pacote do nó 2 para o destino que ocorre com taxa μ_1 , leva o sistema para três estados possíveis:

d1. $i(w_i), j(w_j), k - 1(w_k)$, Se:

- $i = 0, w_i = 0, j \leq 1, w_j \leq b, k = 1, w_k \leq b$, ou seja, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 com taxa μ_1 , o nó 2 conclui com sucesso sua transmissão para o destino com taxa μ_1 sem interferência, isto se o nó 1 não estiver transmitindo também, caso contrário, essa transmissão ocorre com taxa μ_2 com interferência.

d2. $i + 1(wi - 1), j(wj), k - 1(wk)$, Se:

- $i = 0, wi > 0, j \leq 1, wj \leq b, k = 1, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 com taxa μ_1 , o nó 2 conclui sua transmissão para o destino com taxa μ_1 , isto se o nó 1 não estiver transmitindo simultaneamente, caso contrário, essa transmissão ocorre com uma taxa menor μ_2 com interferência, e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1 com taxa μ_1 .

d3. $i(wi), j(wj), k(wk - 1)$, Se:

- $i = 0, wi = 0, j \leq 1, wj \leq b, k = 1, wk > 0$, ou seja, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 com taxa μ_1 sem interferência, o nó 2 conclui com sucesso sua transmissão para o destino com taxa μ_1 sem interferência se o nó 1 não estiver transmitindo simultaneamente, caso contrário, essa transmissão ocorre com taxa μ_2 com interferência e o nó 2 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o destino.

4.2 MODO B[HALF, DIREC]

Neste modo de operação, apenas dois servidores precisam de *buffer* (b), aqui, somente os servidores i e k podem transmitir simultaneamente, o servidor k não necessita de *buffer*, visto que sempre que ele recebe um pacote do servidor j pode transmiti-lo, no entanto, enquanto o servidor k estiver transmitindo, o servidor j não pode transmitir, pois os dois não podem transmitir simultaneamente. Assim, apenas os servidores i e j necessitam de *buffer* neste modo. Para este modo, o conjunto de estados fica definido da seguinte maneira:

$$S = \{x \mid 0 \leq i, j, k \leq 1; i+j+k \leq 2; i+j \leq 1; j+k \leq 1; wi, wj \leq b, wk=0; i+wi \leq b+1; j+wj \leq b+1\} \quad (30)$$

4.2.1 DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS

Abaixo descrevemos todas as possíveis transições para este modo de operação, com tamanho do *buffer*, (b), variável. O estado inicial corresponde a $i = wi = j = wj = k = wk = 0$. Assim sendo temos:

- a) Dado um estado $i(wi), j(wj), k(wk)$, a chegada de um pacote no nó S que ocorre com taxa λ , leva o sistema para dois estados possíveis:

a1. $i + 1(wi), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 0, wi \leq b, j = 0, wj = 0, k = 0, wk = 0$, ou seja, neste estado não existem pacotes na rede. Portanto, o pacote que chega começa a ser transmitido do nó S para o nó 1 com taxa μ_1 , ou,
 - $i = 0, wi \leq b, j = 0, wj \leq b, k = 1, wk = 0$, ou seja, o pacote que chega começa a ser transmitido do nó S para o nó 1 com taxa μ_1 e causa interferência na transmissão do nó 2 para o destino, que passa a ocorrer com taxa μ_3 , com interferência da transmissão do nó S ao nó 2.

a2. $i(wi + 1), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi < b, j = 0, wj \leq b, k \leq 1, wk = 0$, ou seja, o nó 2 pode estar transmitindo para o destino com taxa μ_3 , o nó S está transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 . O pacote que chega é colocado em espera no nó S, ou,
- $i = 0, wi < b, j = 1, wj \leq b, k = 0, wk = 0$, ou seja, o nó 1 está transmitindo para o nó 2 com taxa μ_1 . O pacote que chega é colocado em espera no nó S.

b) A transmissão de um pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ_1 , leva o sistema para cinco estados possíveis:

b1. $i - 1(wi), j + 1(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi \leq b, j = 0, wj \leq b, k = 0, wk = 0$, ou seja, a transmissão do nó S para o nó 1 que ocorre com taxa μ_1 é concluída e o pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2 com taxa μ_1 .

b2. $i - 1(wi), j(wj + 1), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi \leq b, j = 0, wj < b, k = 1, wk = 0$, ou seja, o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_3 , a transmissão do nó S para o nó 1 que ocorre com taxa μ_1 é concluída, e o pacote é colocado em espera no nó 1.

b3. $i(wi - 1), j(wj + 1), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi > 0, j = 0, wj < b, k = 1, wk = 0$, ou seja, o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_3 , a transmissão do nó S para o nó 1 que ocorre com taxa μ_1 é concluída, e o nó S retira o pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1 com taxa μ_1 .

b4. $i - 1(wi), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi \leq b, j = 0, wj = b, k = 1, wk = 0$, ou seja, o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_3 , a transmissão do nó S para o nó 1 que ocorre com taxa μ_1 é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 1 por falta de espaço no *buffer*.

b5. $i(wi - 1), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi > 0, j = 0, wj = b, k = 1, wk = 0$, ou seja, o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_3 , a transmissão do nó S para o nó 1 que ocorre com taxa μ_1 é concluída sem sucesso por falta de espaço no buffer do servidor 1. O nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1 com taxa μ_1 .

c) A transmissão de um pacote do nó 1 para o nó 2 que ocorre com taxa μ_1 , leva o sistema para dois estados possíveis:

c1. $i(wi), j - 1(wj), k + 1(wk)$, Se:

- $i = 0, wi \leq b, j = 1, wj \leq b, k = 0, wk = 0$, ou seja, a transmissão do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ_1 , é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o destino com taxa μ_1 .

c2. $i + 1(wi - 1), j - 1(wj), k + 1(wk)$, Se:

- $i = 0, wi > 0, j = 1, wj \leq b, k = 0, wk = 0$, ou seja, a transmissão do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ_1 , é concluída com sucesso, o pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o destino com taxa μ_3 e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1 com taxa μ_1 .

d) A transmissão de um pacote do nó 2 para o destino que ocorre com taxa μ_1 , leva o sistema para dois estados possíveis:

d1. $i(wi), j(wj), k - 1(wk)$, Se:

- $i \leq 1, wi \leq b, j = 0, wj \leq b, k = 1, wk = 0$, ou seja, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , o nó 2 conclui sua transmissão para o destino com taxa μ_3 , isto se o nó 1 estiver transmitindo, caso contrário, essa transmissão ocorre com taxa μ_1 sem interferência, ou,

- $i = 1, wi \leq b, j = 0, wj > 0, k = 1, wk = 0$, ou seja, o nó S está transmitindo para o nó 2 com taxa μ_1 , o nó 2 conclui sua transmissão para o destino com taxa μ_3 .

d2. $i(wi), j + 1(wj - 1), k - 1(wk)$, Se:

- $i = 0, wi \leq b, j = 0, wj \leq b, k = 1, wk = 0$, ou seja, o nó 2 conclui com sucesso sua transmissão para o destino com taxa μ_1 . Por sua vez o nó 1 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 2 com taxa μ_1 .

4.3 MODO C[FULL, DIREC]

Neste modo de operação, todos os servidores precisam de *buffer* (b), pois todos eles podem transmitir e receber simultaneamente. Para este modo, o conjunto de estados fica definido da seguinte maneira:

$$S = \{x \mid 0 \leq i, j, k \leq 1; i + j + k \leq 3; 0 \leq wi, wj, wk \leq b; i + wi \leq b + 1; j + wj \leq b + 1; k + wk \leq b + 1\} \quad (31)$$

4.3.1 DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS

Abaixo descrevemos todas as possíveis transições para este modo de operação, com tamanho do *buffer*, (b), variável. O estado inicial corresponde a $i = wi = j = wj = k = wk = 0$. Assim sendo temos:

a) Dado um estado $i(wi), j(wj), k(wk)$, a chegada de um pacote no nó S, que ocorre com taxa λ , leva o sistema para dois estados possíveis:

a1. $i + 1(wi), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 0, wi \leq b, j \leq 1, wj \leq b, k \leq 1, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 , o nó 2 pode estar transmitindo para o destino com taxa μ_4 , e o pacote que chega no nó S começa a ser transmitido para o nó 1 com taxa μ_1 .

a2. $i(wi + 1), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi < b, j \leq 1, wj \leq b, k \leq 1, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 , o nó 2 pode estar transmitindo para o destino com taxa μ_4 , e pacote que chega é colocado em espera no nó S.

b) A transmissão de um pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ_1 , leva o sistema para seis estados possíveis:

b1. $i - 1(wi), j + 1(wj), k(wk)$, Se:

➤ $i = 1, wi \leq b, j = 0, wj \leq b, k \leq 1, wk \leq b$, ou seja, o nó 2 pode estar transmitindo para destino com taxa μ_3 , o nó S conclui sua transmissão para o nó 1 com sucesso com taxa μ_1 e o pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2 com taxa μ_1 .

b2. $i(wi - 1), j + 1(wj), k(wk)$, Se:

➤ $i = 1, wi > 0, j = 0, wj \leq b, k \leq 1, wk \leq b$, ou seja, a transmissão do nó S para o nó 1 que ocorre com taxa μ_1 é concluída, o nó 2 pode estar transmitindo para o destino com taxa μ_3 , o pacote que chega começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2 com taxa μ_2 e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.

b3. $i - 1(wi), j(wj + 1), k(wk)$, Se:

➤ $i = 1, wi \leq b, j = 1, wj < b, k \leq 1, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 está transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 , o nó 2 pode estar transmitindo para destino com taxa μ_4 , o nó S conclui com sucesso sua transmissão para o nó 1 com taxa μ_1 e o pacote é colocado em espera no nó 1.

b4. $i(wi - 1), j(wj + 1), k(wk)$, Se:

➤ $i = 1, wi > 0, j = 1, wj < b, k \leq 1, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 está transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 , o nó 2 pode estar transmitindo para destino com taxa μ_4 , o nó S conclui sua transmissão para o nó 1 com taxa μ_1 e o pacote é colocado em espera no nó 1, o nó S retira um pacote em espera no *buffer* e começa a transmitir para o nó 1 com taxa μ_1 .

b5. $i - 1(wi), j(wj), k(wk)$, Se:

➤ $i = 1, wi \leq b, j = 1, wj = b, k \leq 1, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 está transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 , o nó 2 pode estar transmitindo para o destino com taxa μ_4 , o nó S conclui sem sucesso sua transmissão para o nó 1 com taxa μ_1 , isto porque o pacote é descartado no nó 1 por falta de espaço no *buffer*.

b6. $i(wi - 1), j(wj), k(wk)$, Se:

- $i = 1, wi > 0, j = 1, wj = b, k \leq 1, wk \leq b$, ou seja, o nó 1 está transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 , o nó 2 pode estar transmitindo para o destino com taxa μ_4 , o nó S conclui sem sucesso sua transmissão para o nó 1 com taxa μ_1 , pois o pacote é descartado no nó 1 por falta de espaço no *buffer*. O nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1 com taxa μ_1 .

c) A transmissão de um pacote do nó 1 para o nó 2 que ocorre com taxa μ_1 , leva o sistema para seis estados possíveis:

c1. $i(wi), j - 1(wj), k + 1(wk)$, Se:

- $i \leq 1, wi \leq b, j = 1, wj \leq b, k = 0, wk \leq b$, ou seja, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , a transmissão do nó 1 para o nó 2 que ocorre com taxa μ_1 é concluída com sucesso, isto se o nó S não estiver transmitindo, caso contrário a taxa dessa transmissão acontece com taxa μ_2 com interferência, e o pacote começa a ser transmitido para o destino com taxa μ_3 caso a transmissão do nó S para 1 esteja acontecendo; caso contrário essa transmissão ocorre com taxa μ_1 .

c2. $i(wi), j - 1(wj), k(wk + 1)$, Se:

- $i \leq 1, wi \leq b, j = 1, wj \leq b, k = 1, wk < b$, ou seja, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_4 , caso o nó S também esteja transmitindo; caso contrário, essa transmissão ocorrerá com uma taxa μ_2 ; a transmissão do nó 1 para o nó 2 que ocorre com taxa μ_1 é concluída com sucesso, isto se o nó S não estiver transmitindo, caso contrário a taxa dessa transmissão será μ_2 , e o pacote é colocado em espera no nó 2.

c3. $i(wi), j(wj - 1), k + 1(wk)$, Se:

- $i \leq 1, wi \leq 0, j = 1, wj > 0, k = 0, wk \leq b$, ou seja, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , a transmissão do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ_1 , é concluída com sucesso, isto se o nó S não estiver transmitindo, caso contrário a taxa dessa transmissão muda para uma taxa menor μ_2 , e o pacote começa a

ser transmitido do nó 2 para o destino com taxa μ_1 . O nó 1 retira um pacote em espera no buffer e começa a transmitir para o nó 2.

c4. $i(wi), j(wj - 1), k(wk + 1)$, Se:

- $i \leq 1, wi \leq b, j = 1, wj > 0, k = 1, wk < b$, ou seja, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_4 , isto se a transmissão do nó S para o nó 2 estiver acontecendo, caso contrário, a taxa dessa transmissão será μ_2 . O nó 1 conclui com sucesso sua transmissão para o nó 2 com taxa μ_2 , caso a transmissão de S para 1 estiver acontecendo, caso contrário, a transmissão de 1 para 2 correrá com taxa μ_1 , e o pacote é colocado em espera no nó 2. O nó 1 retira um pacote em espera no *buffer* e começa a transmitir para o nó 2 com taxa μ_1 .

c5. $i(wi), j - 1(wj), k(wk)$, Se:

- $i \leq 1, wi \leq b, j = 1, wj \leq b, k = 1, wk = b$, ou seja, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_4 , isto se a transmissão de S para 1 estiver acontecendo, caso contrário o nó 2 transmite para o destino com taxa μ_2 . A transmissão do nó 1 para o nó 2 que ocorre com taxa μ_2 com interferência é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 2 por falta de espaço no seu *buffer*.

c6. $i(wi), j(wj - 1), k(wk)$, Se:

- $i \leq 1, wi \leq b, j = 1, wj > 0, k = 1, wk = b$, ou seja, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , o nó 2 está transmitindo para o destino com taxa μ_4 , isto se a transmissão de S para 1 estiver acontecendo, caso contrário o nó 2 transmite para o destino com taxa μ_2 . A transmissão do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ_2 , com interferência, é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 2 por falta de espaço no seu *buffer*, o nó 1 retira um pacote em espera e começa transmitir para o nó 2.

d) A transmissão de um pacote do nó 2 para o destino que ocorre com taxa μ_1 , leva o sistema para dois estados possíveis:

d1. $i(wi), j(wj), k - 1(wk)$, Se:

- $i \leq 1, wi \leq b, j \leq 1, wj \leq b, k = 1, wk \leq b$, ou seja, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 caso a transmissão de S para 1 estiver acontecendo, caso contrário, a transmissão de 1 para 2 correrá com taxa μ_1 , o nó 2 conclui sua transmissão para o destino com taxa μ_1 caso nenhuma das transmissões descritas acima estiverem acontecendo, no entanto, se a transmissão de S para 1 estiver acontecendo, a taxa de transmissão de 2 para o destino será μ_3 , se a transmissão de 1 para 2 estiver acontecendo, a taxa de transmissão de 2 para o destino será μ_2 . Já se as duas transmissões estiverem acontecendo ao mesmo tempo, a taxa de transmissão de 2 para o destino ocorrerá com uma taxa muito menor, μ_4 , pois o nó 2 estará sofrendo interferência das transmissões de S e de 1.

d2. $i(wi), j(wj), k - 1(wk - 1)$, Se:

- $i \leq 1, wi \leq b, j \leq 1, wj \leq b, k = 1, wk > 0$, ou seja, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1 com taxa μ_1 , o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 com taxa μ_2 caso a transmissão de S para 1 estiver acontecendo, caso contrário, a transmissão de 1 para 2 correrá com taxa μ_1 , o nó 2 conclui sua transmissão para o destino com taxa μ_1 caso nenhuma das transmissões descritas acima estiverem acontecendo, no entanto, se somente a transmissão de S para 1 estiver acontecendo, a taxa de transmissão de 2 para o destino será μ_3 , se somente a transmissão de 1 para 2 estiver acontecendo, a taxa de transmissão de 2 para o destino será μ_2 . Já se as duas transmissões estiverem acontecendo, a taxa de transmissão de 2 para o destino ocorrerá com uma taxa muito menor μ_4 , pois o nó 2 estará sofrendo interferência das transmissões de S e de 1, e o nó 2 retira um pacote em espera no buffer e começa a transmitir para o destino.

4.4 DIAGRAMAS DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS COM *BUFFER* = 1

Esta sessão apresenta, a título de ilustração, os diagramas de transição de estados dos modos A[Full,Omni], B[Half,Direc] e C[Full,Direc] com *buffer* = 1. Por outro lado, suprimimos a descrição detalhada desses diagramas, devido ao fato da resolução

dos modelos basearem-se na descrição geral para o modelo com *buffer* de tamanho variável (b), apresentado nas sessões anteriores.

4.4.1 MODO A[FULL,OMNI]

A Figura 4.1 mostra o diagrama de transição de estados do modo A[Full,Omni] com *buffer* = 1.

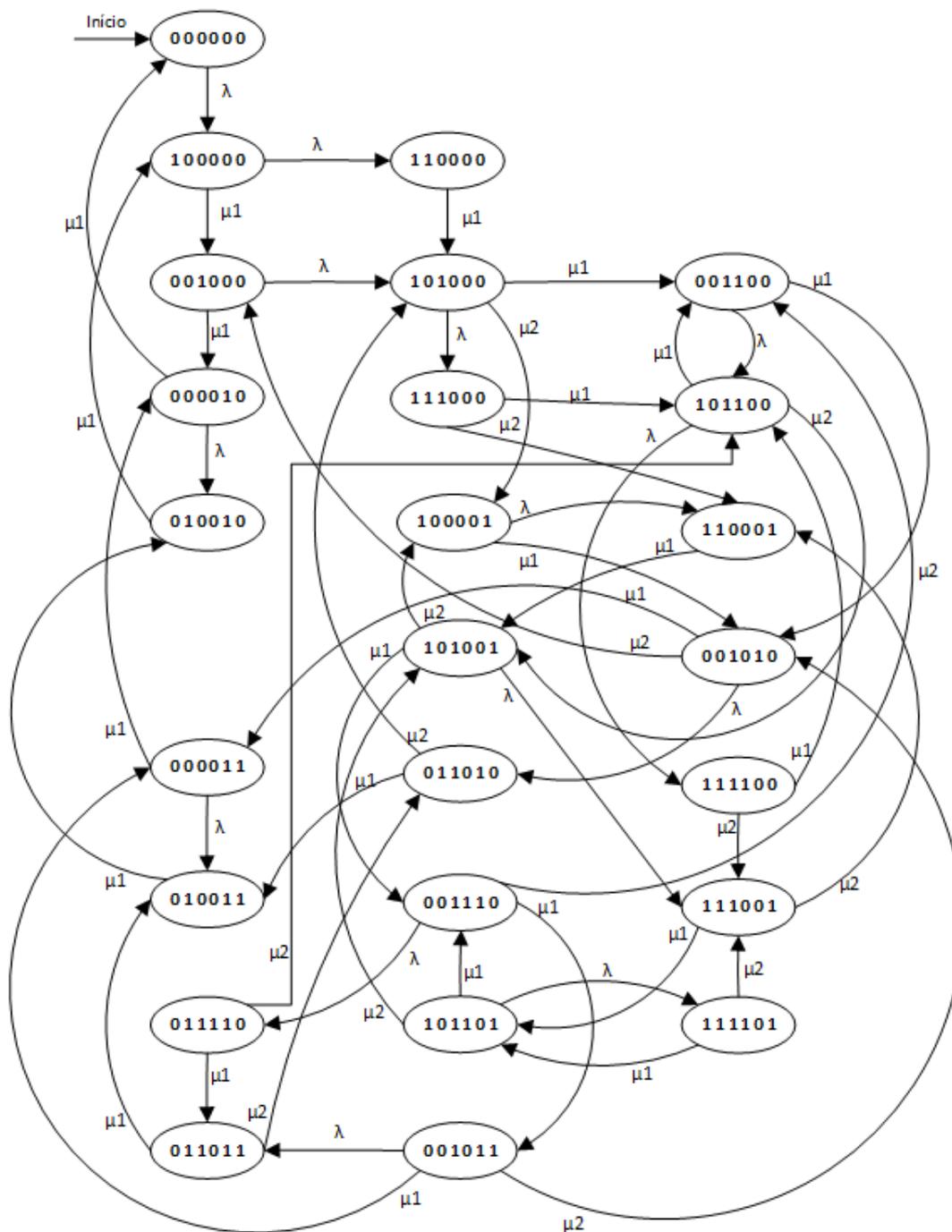


Figura 4.1: Diagrama de Transição de estados modo A[Full,Omni] com *Buffer* = 1.

4.4.2 MODO A[HALF,DIREC]

A Figura 4.2 mostra o diagrama de transição de estados do modo B[Half,Direc] com $buffer = 1$.

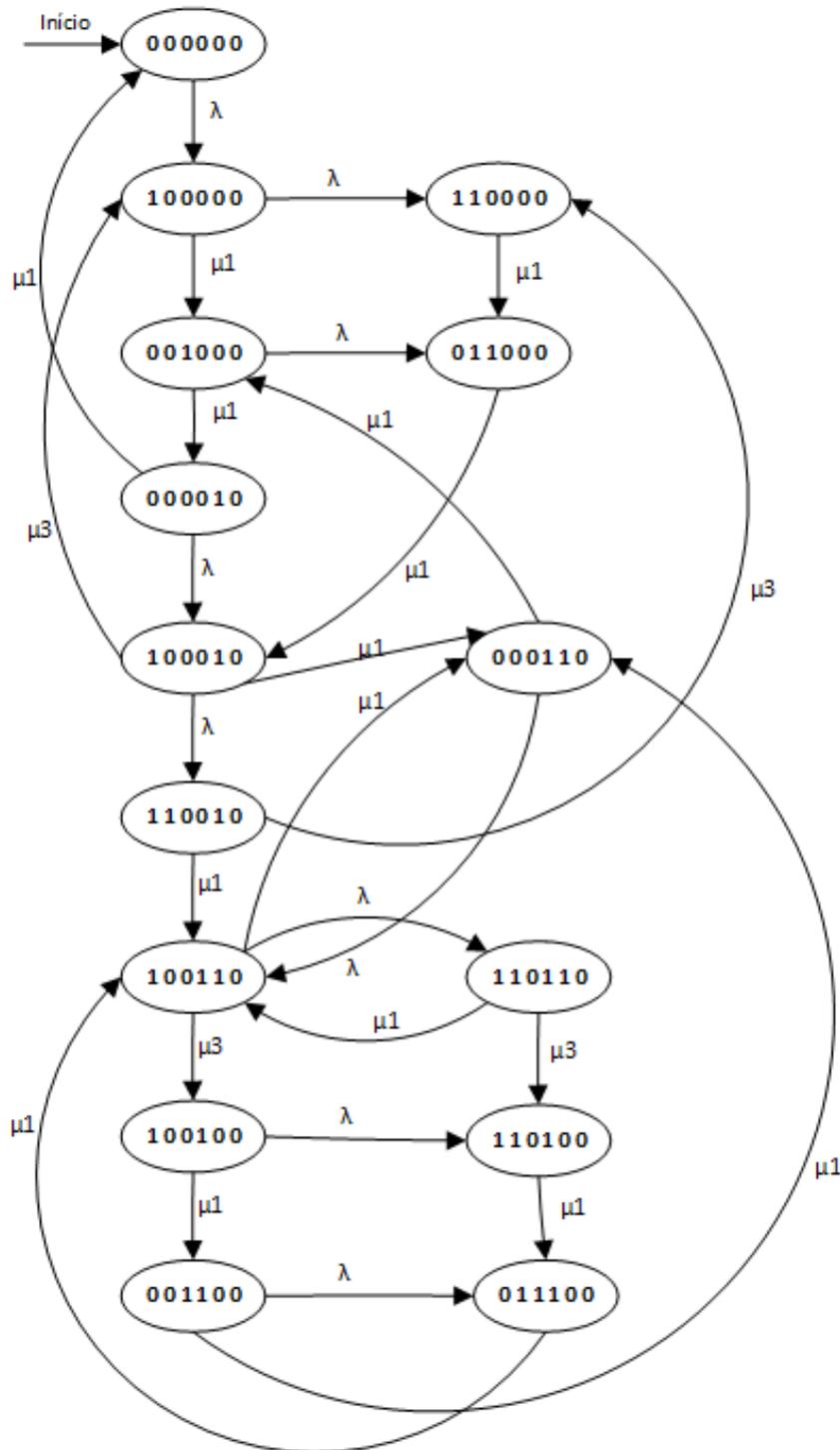


Figura 4.2: Diagrama de Transição de estados modo B[Half, Direc] com $Buffer = 1$.

4.4.3 MODO C[FULL,DIREC]

A Figura 4.3 mostra o diagrama de transição de estados do modo C[Half,Direc] com $buffer = 1$.

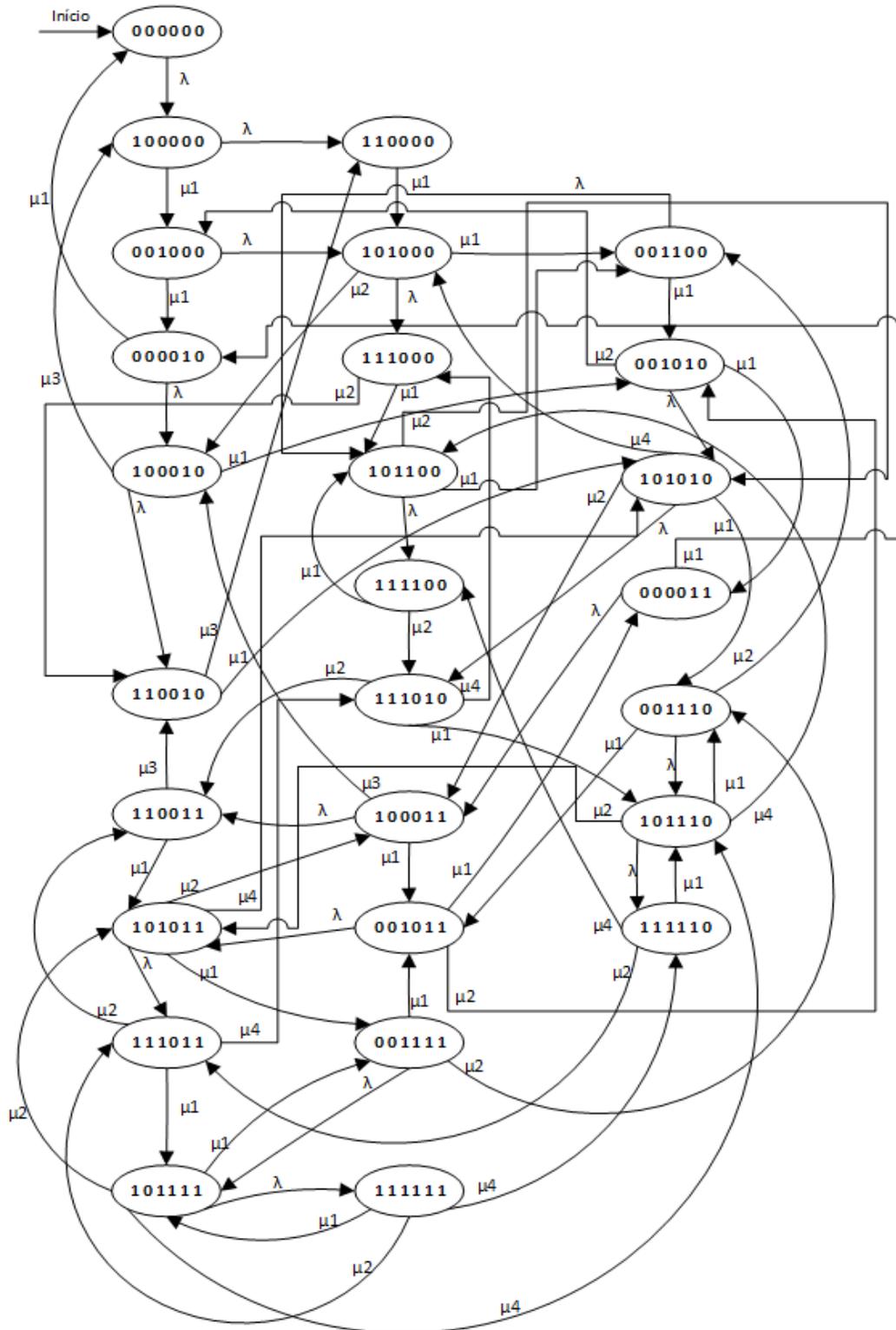


Figura 4.3: Diagrama de Transição de estados modo C[Half, Direc] com $Buffer = 1$.

4.5 MÉTRICAS DE DESEMPENHO PARA O MODELO COM BUFFER

Esta seção apresenta as métricas de desempenho dos modos de operação do modelo com *buffer* apresentados nas sessões anteriores. Para cada um dos modos de operação, é apresentada a avaliação de desempenho e também a comparação entre eles. Os parâmetros utilizados em cada análise são: taxa de chegada de pacotes, λ , variando de 1 a 10 pacotes/segundo, taxa de serviço sem interferência, $\mu_1 = 10$ pacotes/segundos com $SNR_1=10$, $\mu_1 = 16.43$ com $SNR_1=50$, $\mu_1 = 19.27$ com $SNR_1=100$ e três tamanhos de *buffer*, $b=1$, $b=5$ e $b=10$. Toda análise de desempenho é feita em função da taxa de chegada de pacotes, λ , que corresponde ao eixo x .

Como já descrito no modelo sem *buffer*, além da taxa serviço na ausência de interferência, μ_1 , existem as taxas de serviço quando levamos em conta a interferência, que são: μ_2 , μ_3 e μ_4 ; os valores dessas taxas são calculados em função da taxa sem interferência μ_1 , como já descrito na Seção 3.4.1. Os parâmetros para calcular essas taxas são os mesmos apresentados no modelo sem *buffer*.

a) PROBABILIDADE DE BLOQUEIO

A probabilidade de bloqueio é a soma das probabilidades em regime permanente de todos os estados onde o primeiro servidor não tem mais espaço para receber um novo pacote. Essa métrica de desempenho, é calculada através da Equação (32):

$$P = \sum_{x \in S} \pi(x), \text{ Se } wi = b \quad (32)$$

Onde P representa probabilidade de bloqueio, $\pi(x)$ é a probabilidade em regime permanente do estado x da cadeia e $wi = b$ quer dizer que o *buffer* do servidor i está cheio.

A Figura 4.4 mostra que a probabilidade de bloqueio do modo A[Full,Omni] diminui com o aumento do *buffer*, nos três cenários ($SNR_1=10$, $SNR_1=50$ e $SNR_1=100$). Observa-se também que quanto maior for a SNR_1 , menor será a probabilidade de bloqueio. Também observa-se que a probabilidade de bloqueio pouco se altera com o valor de b para valores de b superiores a 5, a partir de um determinado valor de λ . Por exemplo, no cenário em que a $SNR_1=10$, a probabilidade de bloqueio diminui com o aumento do *buffer* de $b = 1$ para $b = 5$, mas é praticamente a mesma para $b = 5$ e $b = 10$, quando $\lambda \geq 4$. Nos três cenários, a probabilidade de bloqueio diminui com o aumento do *buffer* para $b \geq 5$, quando $\lambda \geq 7$. Na Figura 4.5 percebe-se que a probabilidade de bloqueio

do modo B[Half,Direc] diminui com o aumento do *buffer* nos três cenários e também diminui com o aumento da SNR1. A Figura 4.6 mostra que a probabilidade de bloqueio do modo C[Full,Direc] também diminui com o aumento do *buffer* e com o aumento da SNR1.

Na Figura 4.7 observamos a comparação da probabilidade de bloqueio entre os modos do modelo sem interferência apresentado em [34], e os modos do modelo com interferência com *buffer* =10 e SNR1=100. Como esperado, os modos de operação do modelo sem interferência, apresentam menor probabilidade de bloqueio em relação aos modos com interferência. Por outro lado, podemos observar também que os modos que fazem o uso de antenas direcionais apresentam menor probabilidade de bloqueio em relação ao modo que utiliza antena omnidirecional. Quando comparamos somente os modos do modelo apresentado nesta dissertação, observa-se que o modo C[Full,Direc] SNR1=100 apresenta a menor probabilidade de bloqueio.

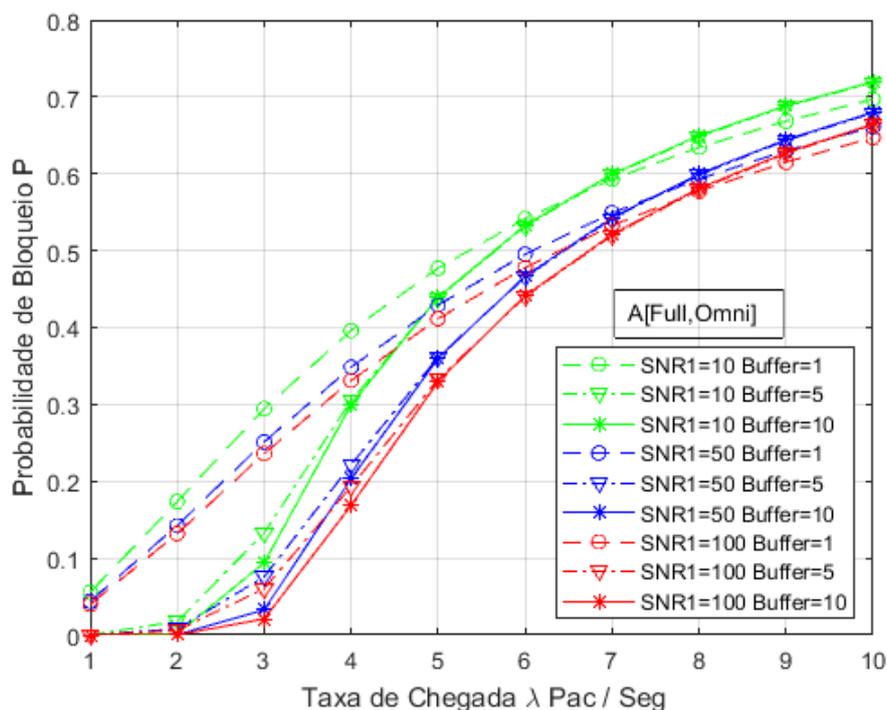


Figura 4.4: Probabilidade de bloqueio Modo A[Full,Omni].

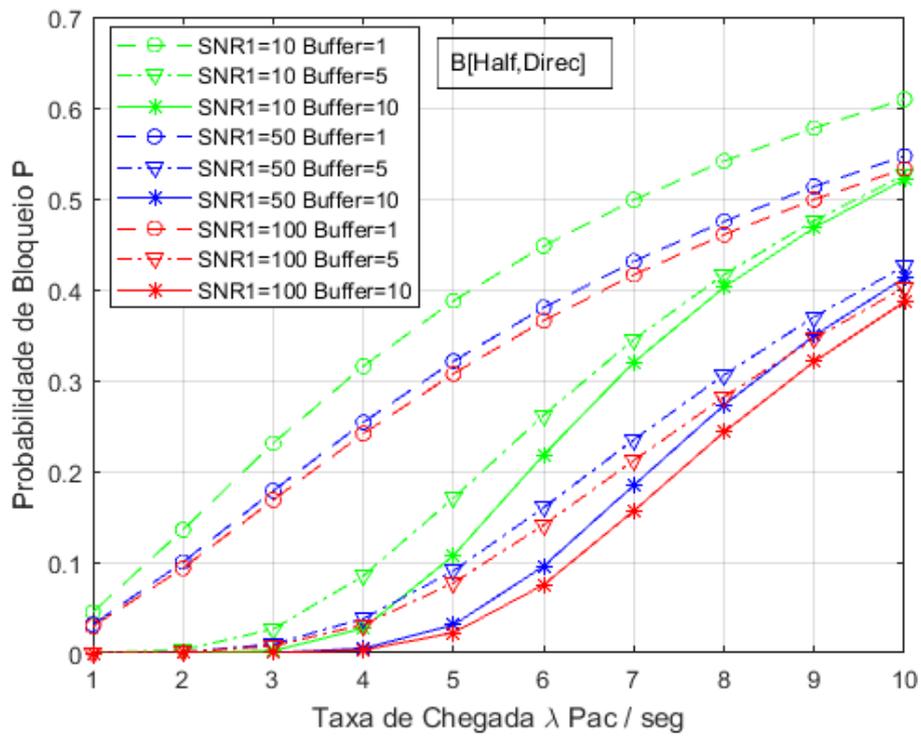


Figura 4.5: Probabilidade de bloqueio Modo B[Half, Direc].

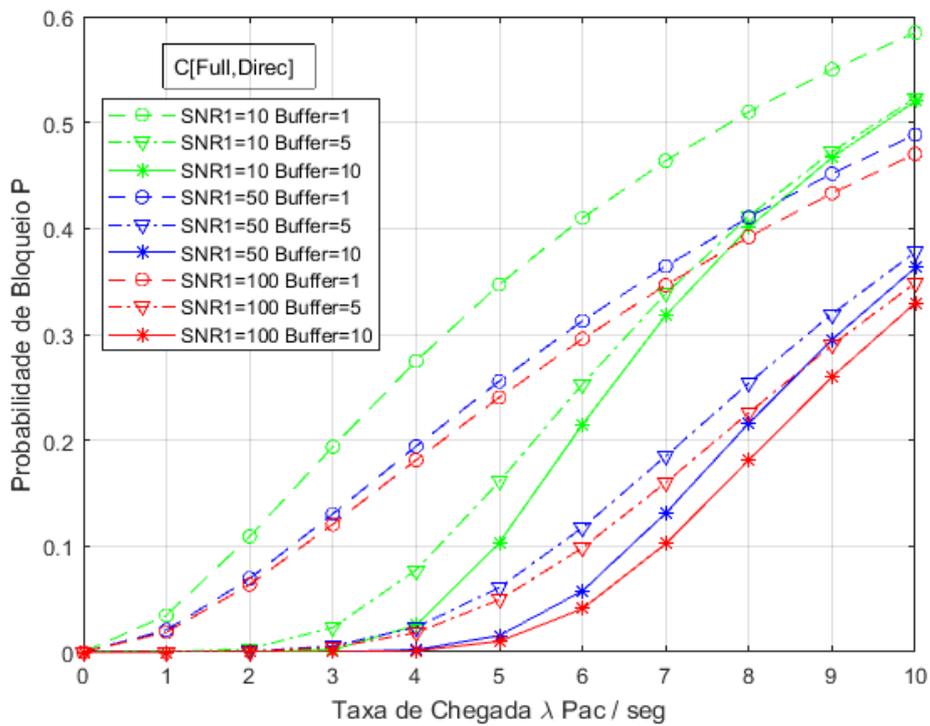


Figura 4.6: Probabilidade de bloqueio Modo C[Full, Direc].

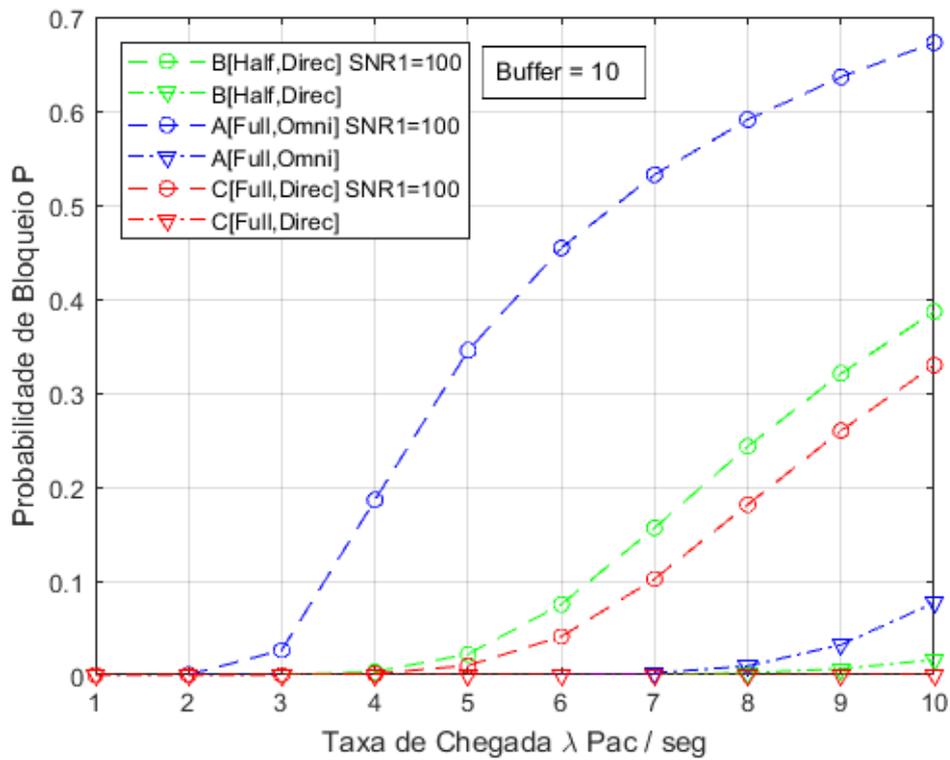


Figura 4.7: Probabilidade de bloqueio com Buffer = 10 e SNR = 100.

b) CAPACIDADE

A capacidade do sistema continua sendo calculada da mesma forma que no modelo sem *buffer*, isto é, por meio da Equação (25), repetida a seguir por conveniência:

$$C = \sum_{x \in S} \pi(x) \gamma, \quad (25)$$

$$\text{Onde } \gamma = \begin{cases} \mu_1, se & k = 1 \\ \mu_2, se & j = 1 e k = 1 \\ \mu_3, se & i = 1 e k = 1 \\ \mu_4, se & i = 1, j = 1 e k = 1 \end{cases}$$

onde $k = 1$ significa que o servidor k está transmitindo para o destino, μ_1 representa a taxa de partida sem interferência, μ_2 taxa de partida na presença de interferência quando os servidores j e k estiverem transmitindo simultaneamente ($j = 1$ e $k = 1$), μ_3 é a taxa de partida na presença de interferência quando os servidores i e k estiverem transmitindo ao mesmo tempo e μ_4 é a taxa de partida quando os servidores i, j e k estiverem transmitindo simultaneamente.

A Figura 4.8 mostra a capacidade do modo A[Full,Omni] do modelo com interferência, onde conseguimos observar que no cenário com $SNR1=10$, a capacidade aumenta com o aumento do *buffer* de $b=1$ até $b=5$, contudo se mantém constante para $b \geq 5$ quando $\lambda \geq 5$. Comportamento semelhante ocorre para valores maiores de SNR, ou seja, a partir de um dado valor de b a capacidade não se altera com o aumento de b , a partir de um dado valor de λ . Observa-se também que quanto maior for a SNR1 maior será a capacidade, ou seja a capacidade aumenta com o aumento da SNR1.

A Figura 4.9 mostra a capacidade do modo B[Half,Direc] do modelo com interferência, observa-se que no cenário com $SNR1=10$, a capacidade aumenta com o aumento do *buffer* de $b=1$ até $b=5$ quando $\lambda \leq 4$, mas diminui com o aumento do *buffer* para $b \geq 5$ quando $\lambda \geq 4$, pois com uma maior carga nos servidores faz com que o nó S tenha sempre pacotes para transmitir ao nó 1, inundando seu *buffer*, isso porque sempre que o nó 2 está a transmitir, o nó S pode transmitir ao nó 1 que tem aguardar que os nós S e 2 terminem de transmitir para poder transmitir, ou seja com o aumento do *buffer* a probabilidade de descarte aumentará e por consequência, diminui o desempenho desse modo. Comportamento semelhante ocorre para os demais valores de SNR1, ou seja, $SNR1=50$ e $SNR1 = 100$.

Na Figura 4.10 observa-se que a capacidade do modo C[Full,Direc] aumenta com o aumento do *buffer* e com o valor da SNR1.

A Figura 4.11 mostra a comparação entre a capacidade dos modos do modelo com interferência com $b = 10$ e $SNR1=100$, com a capacidade dos modos do modelo sem interferência. Como esperado, os modos do modelo sem interferência, apresentam uma capacidade superior em relação aos modos do modelo com interferência, mostrando a maior exatidão do modelo com interferência. Observa-se também que, quando comparamos somente os modos do modelo apresentado nesta dissertação, o modo C[Full,Direc] tem a maior capacidade e o modo B[Half,Direc] tem a menor capacidade.

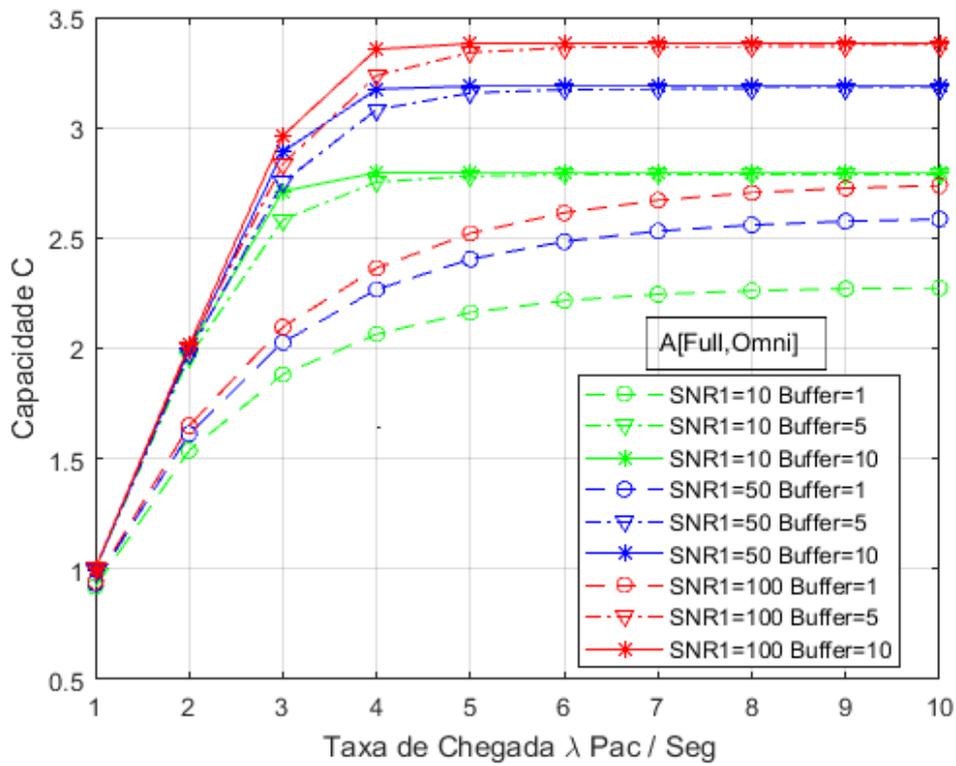


Figura 4.8: Capacidade do Sistema Modo A[Full,Omni].

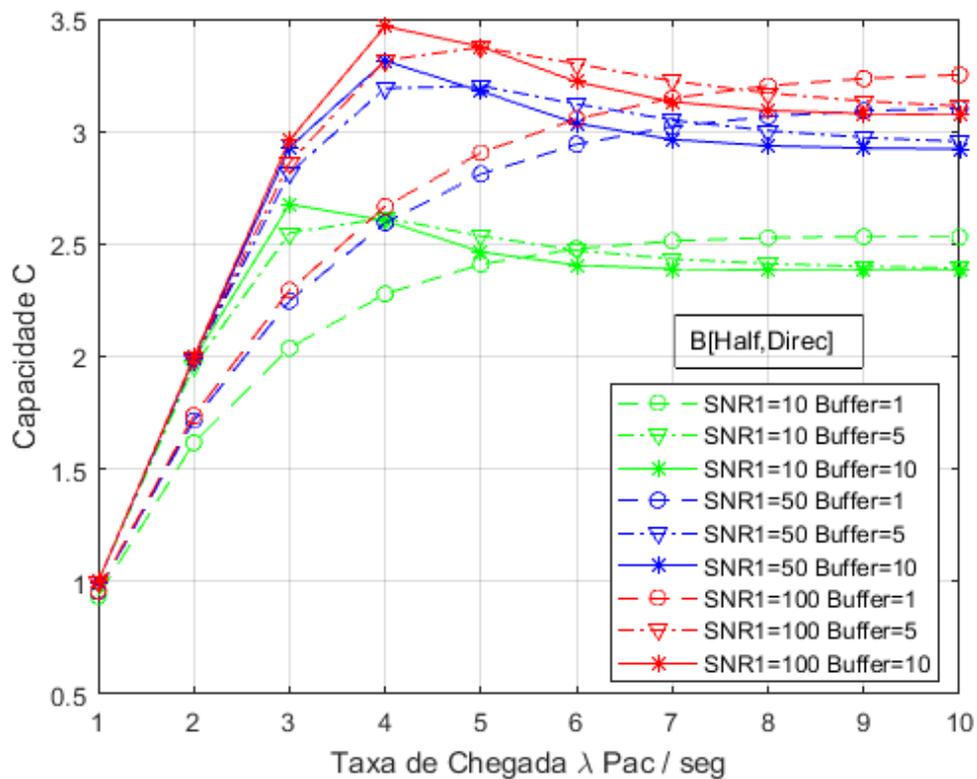


Figura 4.9: Capacidade do Sistema Modo B[Half,Dirac].

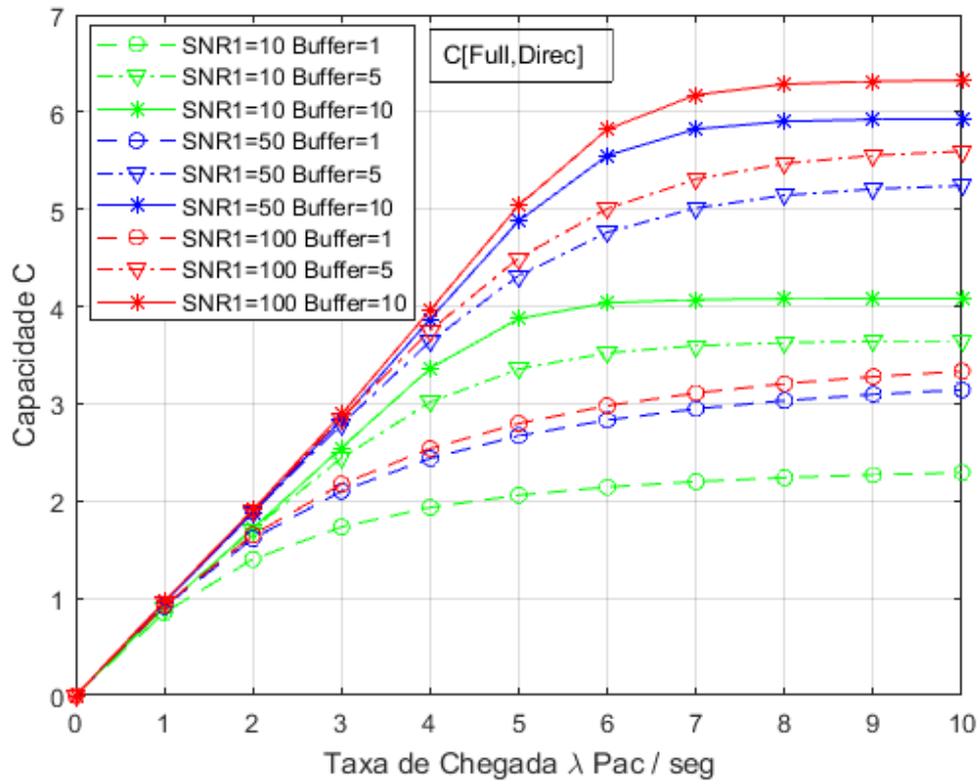


Figura 4.10: Capacidade do Sistema Modo C[Full, Direc].

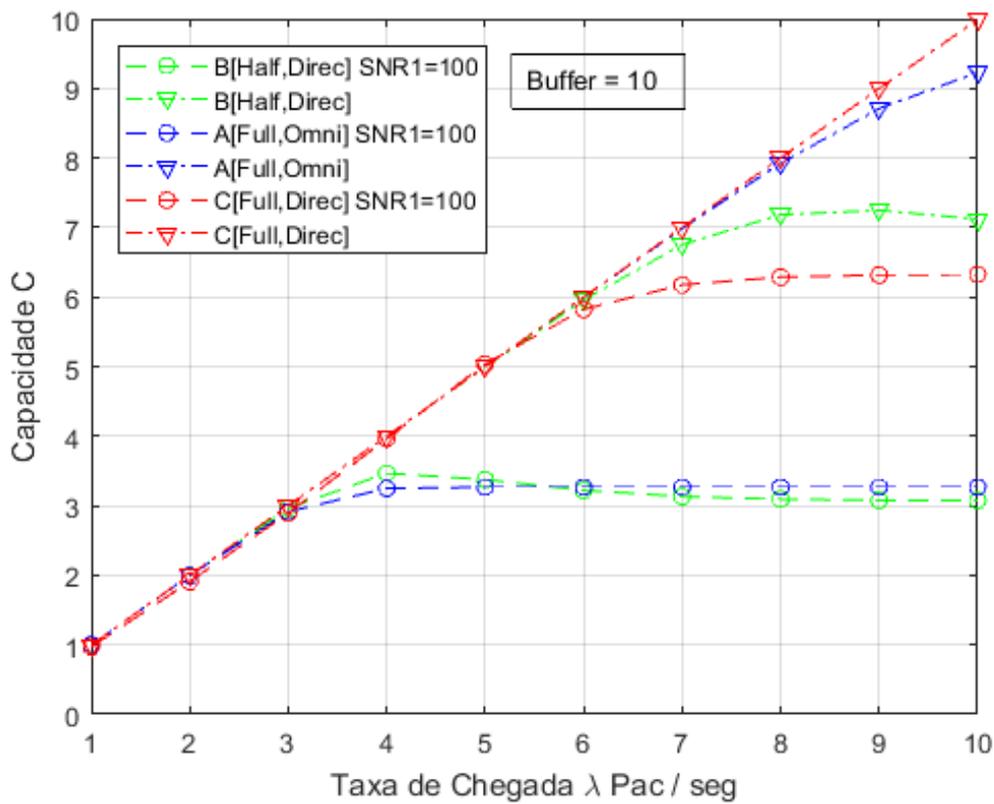


Figura 4.11: Capacidade do Sistema com Buffer = 10 e SNR1=100.

c) PROBABILIDADE DE DESCARTE

A probabilidade de descarte continua sendo calculada da mesma forma que no modelo sem *buffer*, isto é, pela Equação (26):

$$PD = 1 - PS \quad (26)$$

Onde, PD representa a probabilidade de descarte e PS a probabilidade que um pacote que tenha entrado no sistema seja transmitido até o nó de destino com sucesso. Assim, PS é calculada pela razão entre a capacidade do sistema C e a taxa média de pacotes que entram na rede, expressa por:

$$PS = C/\lambda(1 - P)$$

A Figura 4.12 mostra a probabilidade de descarte do modo A[Full,Omni] do modelo com interferência, onde pode-se observar que a probabilidade de descarte diminui com o aumento do *buffer* e da SNR1. Neste modo de operação a probabilidade de descarte é praticamente zero nos cenários em que $b \geq 5$. Observa-se também que quanto maior for a SNR1, menor será a probabilidade de descarte.

A Figura 4.13 mostra a probabilidade de descarte do modo B[Half,Direc] do modelo com interferência, observa-se que a probabilidade de descarte aumenta com o aumento do *buffer*; isso acontece porque, com uma chegada de pacotes nos servidores, o aumento do *buffer* faz com que o servidor *i* tenha sempre pacotes para transmitir para o servidor *j*, enchendo seu *buffer*; isto ocorre porque sempre que o servidor *k* está transmitindo, o servidor *i* pode transmitir também para o servidor *j*, que por sua vez tem de esperar os servidores *i* e *k* terminarem suas transmissões para poder transmitir. Este problema talvez possa ser contornado aumentando o tamanho do *buffer* apenas do servidor *j*, mas isto não foi investigado.

A Figura 4.14 mostra a probabilidade de descarte do modo C[Full,Direc] do modelo com interferência, observa-se que a probabilidade de descarte diminui com o aumento do *buffer* para todos os valores de SNR1. Observa-se também que quanto maior for a SNR1, menor será a probabilidade de descarte.

A Figura 4.15 apresenta a comparação da probabilidade de descarte entre os modos do modelo com interferência com SNR1=100 e *buffer* =10 com os modos do modelo sem interferência. Como esperado, os modos do modelo com interferência apresentam uma probabilidade de descarte maior quando comparado com os modos do modelo sem

interferência. Para o modelo proposto nesta dissertação (modelo com interferência), o modo A[Full, Omni]SNR1=100 tem a menor probabilidade de descarte que é praticamente zero no cenário. O modo B[Half,Direc] apresenta o maior descarte, assim como no modelo sem interferência.

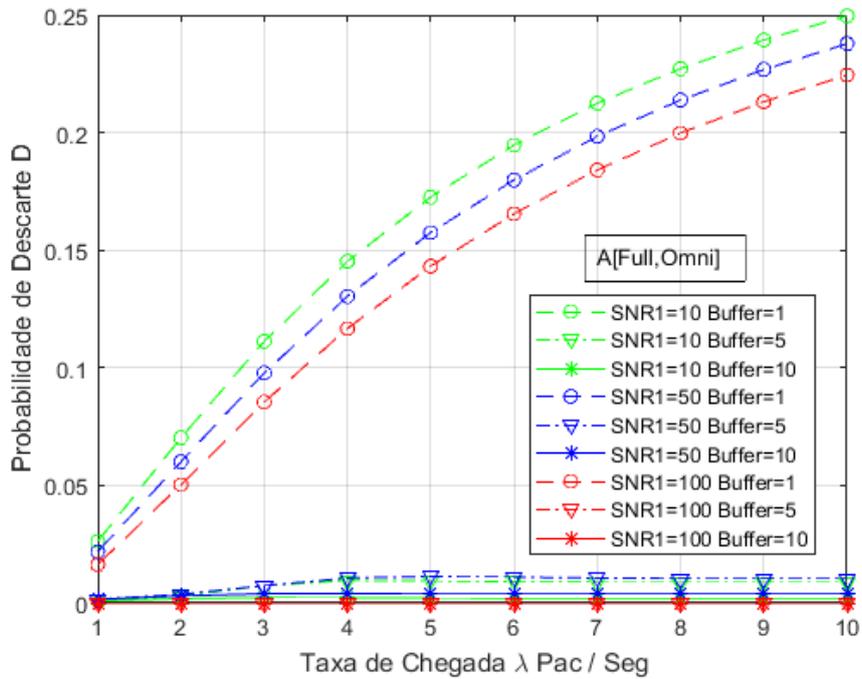


Figura 4.12: Probabilidade de Descarte Modo A[Full,Omni].

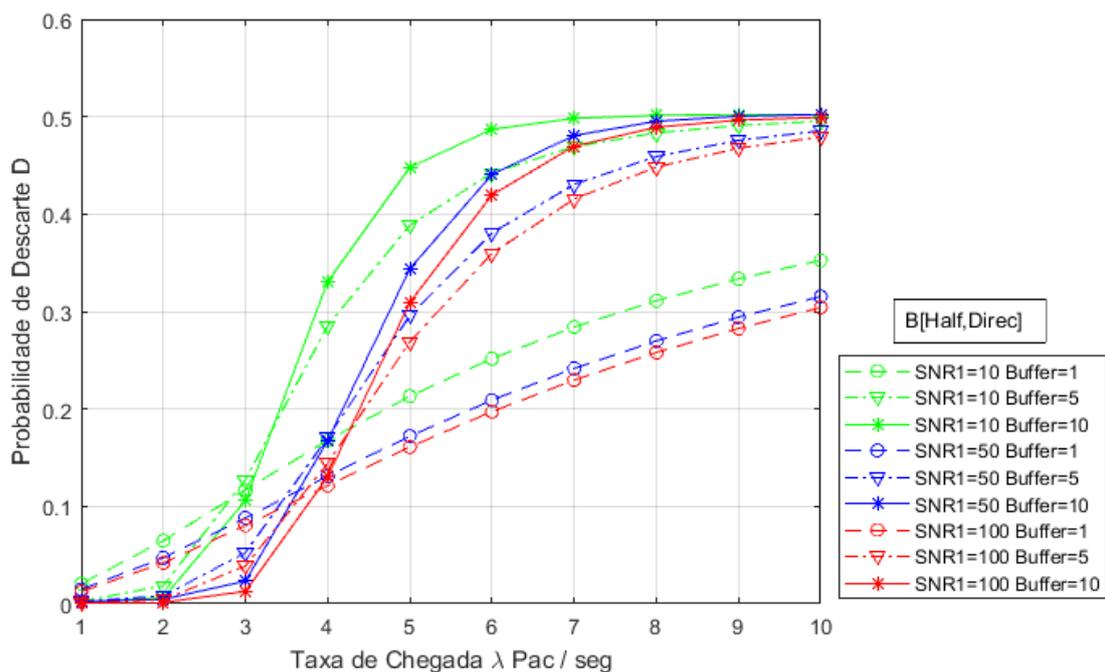


Figura 4.13: Probabilidade de Descarte Modo B[Half, Direc].

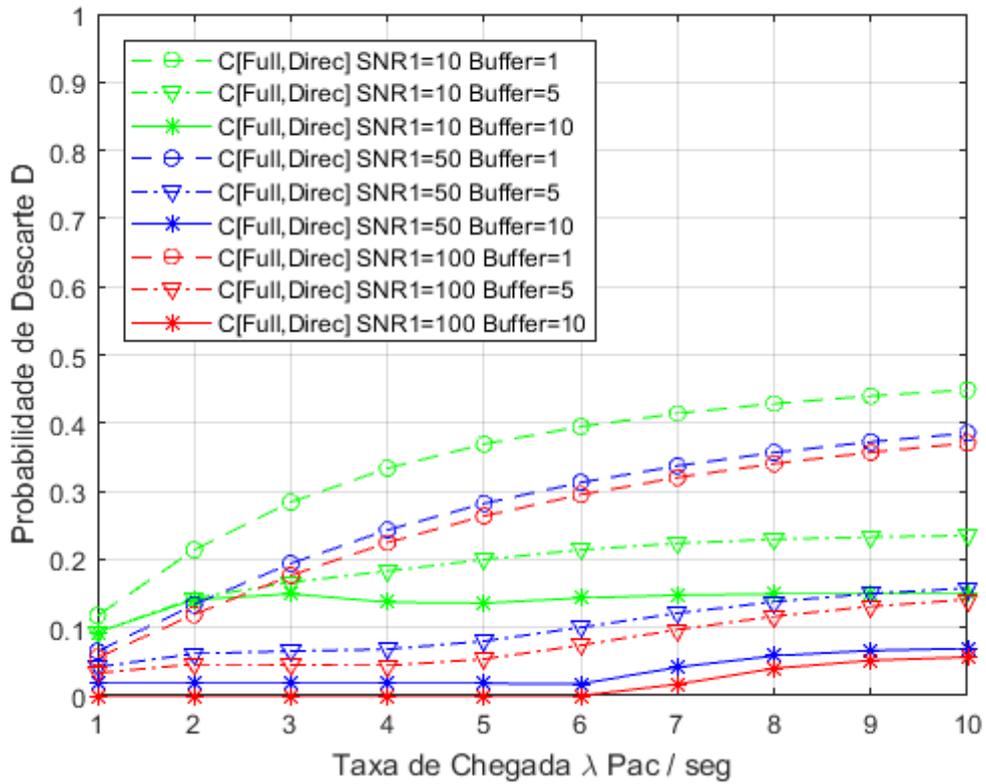


Figura 4.14: Probabilidade de Descarte Modo C[Full,Direc].

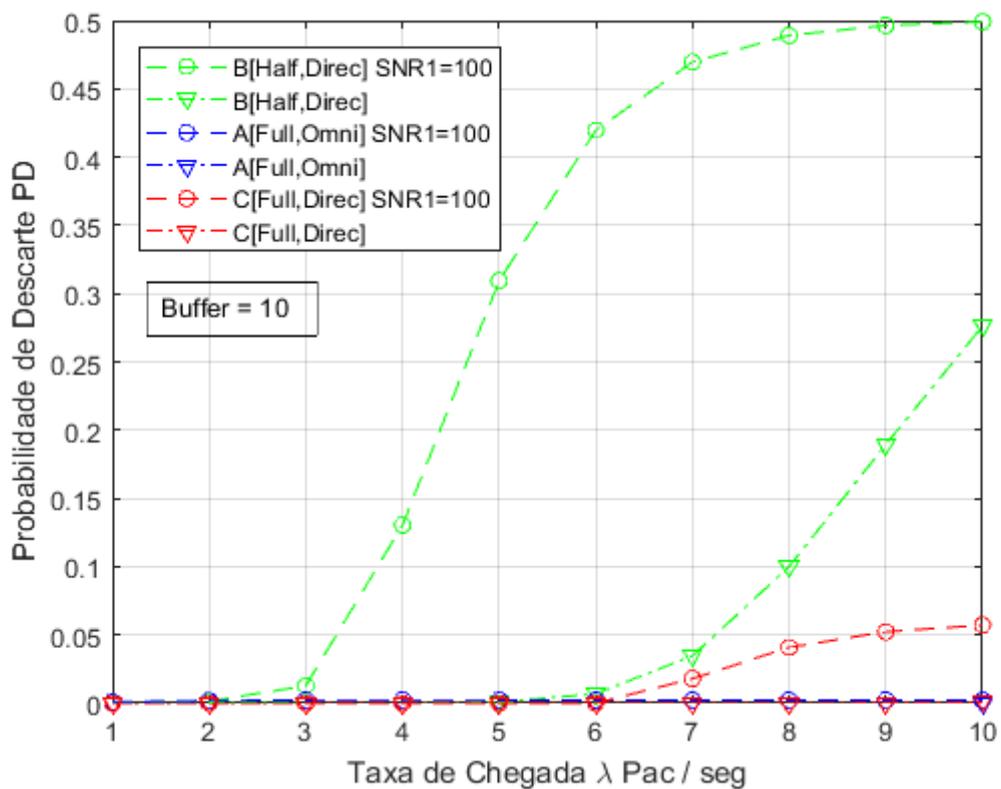


Figura 4.15: Probabilidade de Descarte com Buffer = 10 e SNR1=100.

d) VAZÃO

A vazão continua sendo calculada da mesma forma que no modelo sem *buffer*, isto é, pela Equação (28):

$$Vazão = C/\lambda \quad (28)$$

A Figura 4.16 apresenta a vazão do modo A[Full,Omn] do modelo com interferência. Observa-se que a vazão aumenta com o valor de b até um dado limiar, $b = 5$, a partir do qual o aumento do tamanho do *buffer* pouco influencia a vazão da rede. Assim como na capacidade, observa-se que quanto maior for a SNR1, maior será a vazão.

A Figura 4.17 mostra a vazão do modo B[Half,Direc] do modelo com interferência, observa-se que para SNR1=10, a vazão aumenta com o tamanho do buffer de $b=1$ até $b=5$, quando $\lambda \leq 4$. Porém, quando $\lambda \geq 4$, a vazão diminui com o aumento do *buffer*. Para os cenários com SNR1=50 e 100, a vazão aumenta com o tamanho do buffer de $b=1$ até $b=5$ quando $\lambda \leq 5$, porém, quando $\lambda \geq 5$, a vazão diminui com o aumento do *buffer*.

A Figura 4.18 apresenta a vazão do modo C[Full,Direc] com interferência, observa-se que nos três cenários (SNR1=10, SNR1=50 e SNR1=100), a vazão aumenta com o tamanho do *buffer* e da SNR1, assim como aconteceu com a capacidade.

A Figura 4.19 mostra a comparação entre vazão dos modos do modelo com interferência com SNR1=100 e *buffer* =10, com os modos do modelo sem interferência. Assim como na capacidade, como esperado, os modos do modelo sem interferência apresentam uma maior vazão em relação aos modos do modelo com interferência. Para o modelo proposto neste estudo, nos três cenários, o modo C[Full,Direc] apresenta a maior vazão, assim como no modelo sem interferência, e o modo B[Half,Direc] tem a menor vazão.

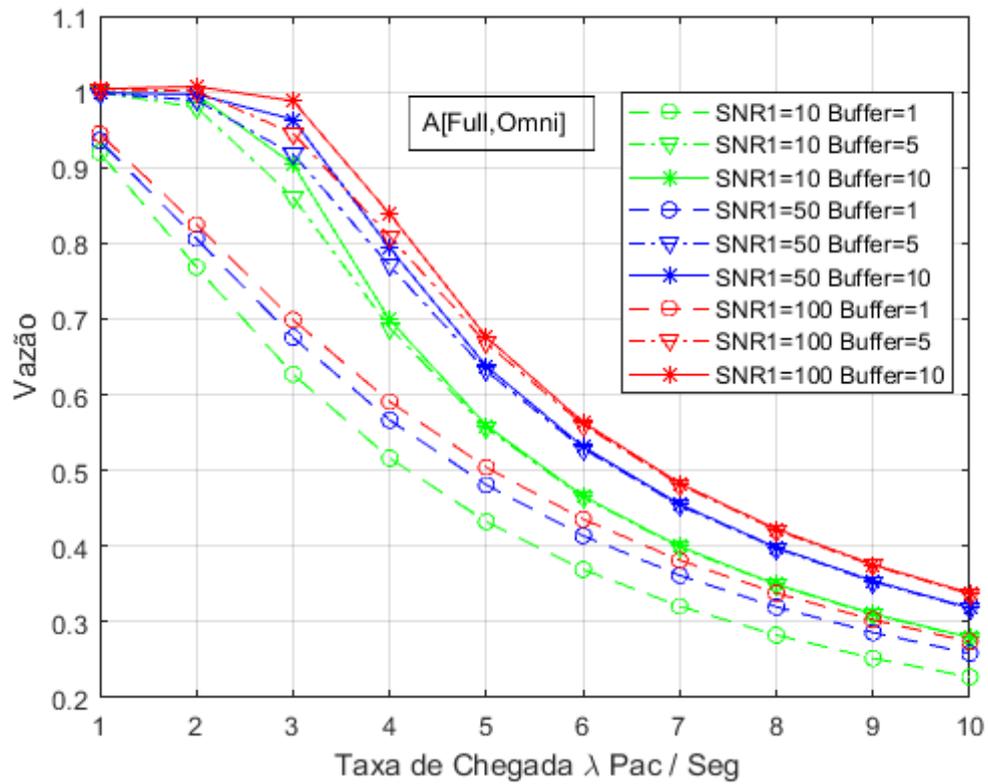


Figura 4.16: Vazão Modo A[Full,Omnij].

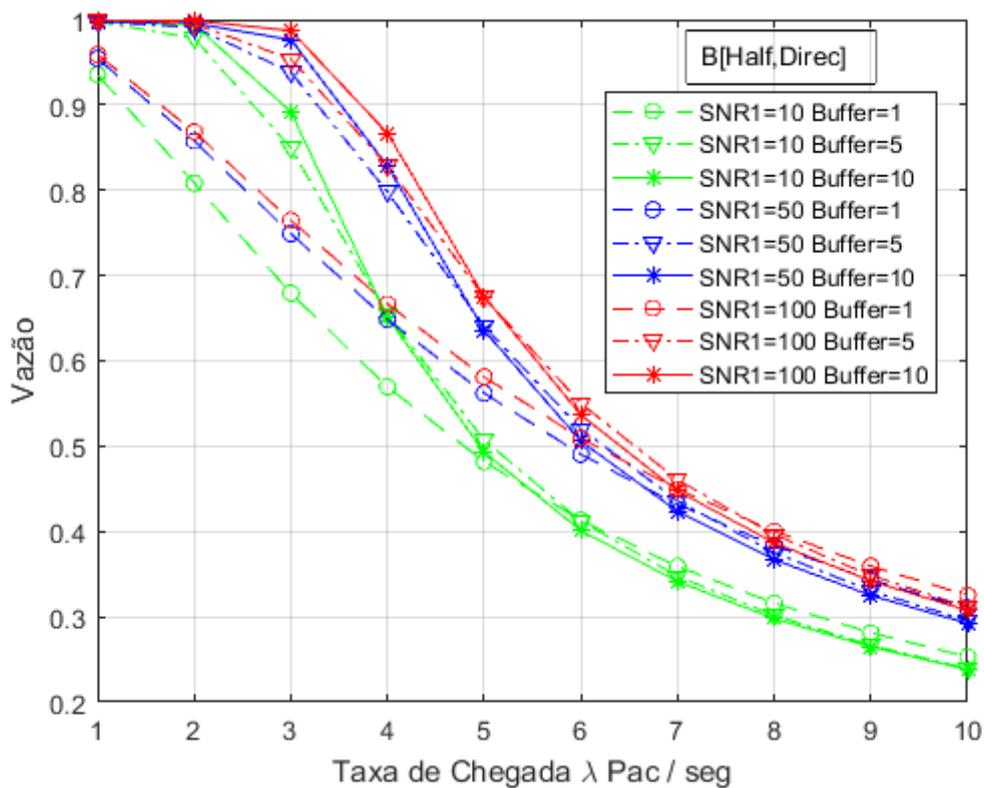


Figura 4.17: Vazão Modo B[Half,Direc].

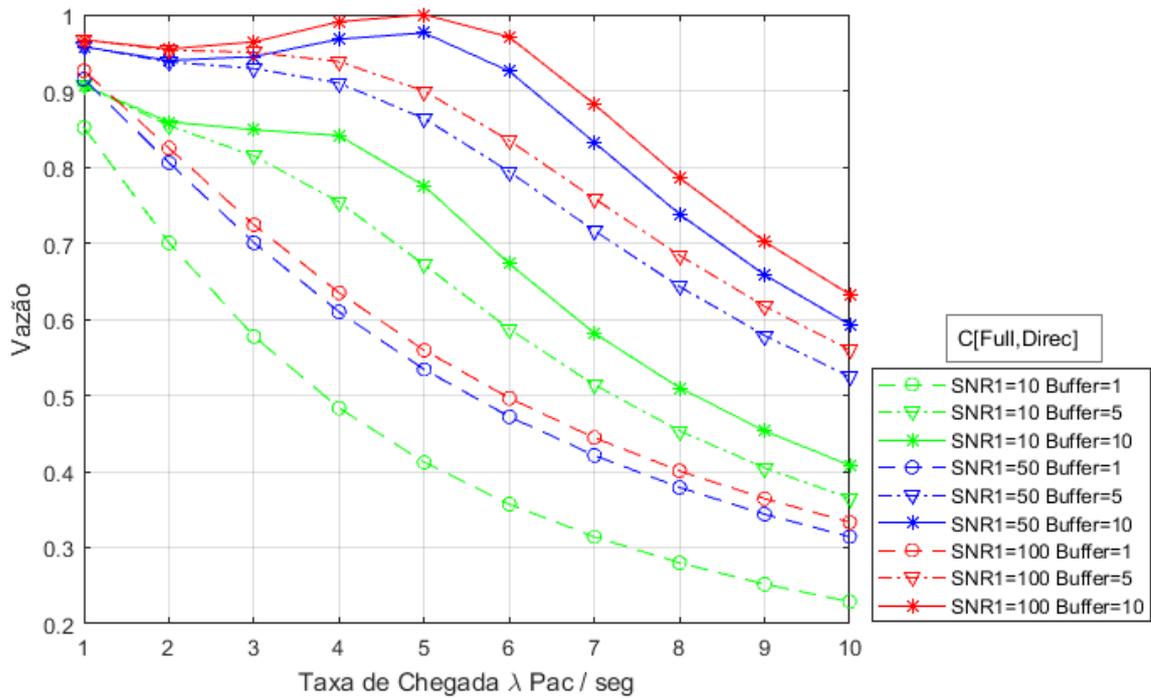


Figura 4.18: Vazão Modo C[Full, Direc].

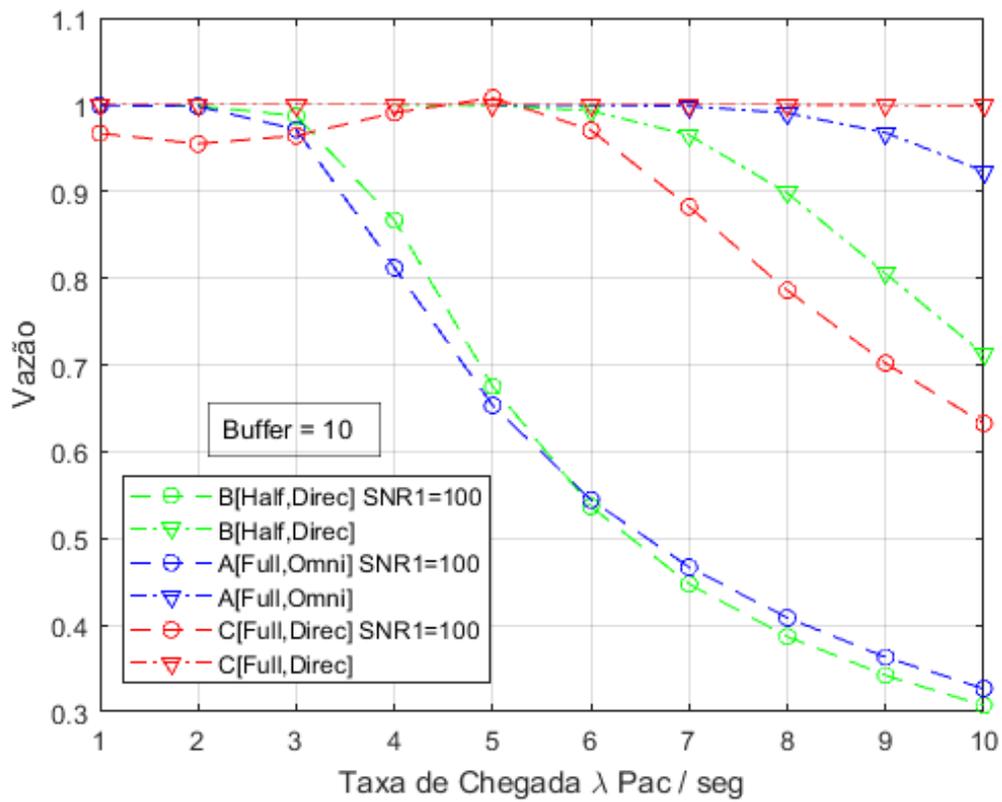


Figura 4.19: Vazão com Buffer = 10 e SNR1=100.

a) NÚMERO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA

O número médio de elementos no sistema continua sendo calculado da mesma forma que no modelo sem *buffer*, isto é, pela Equação (29):

$$Eq = \sum_{x \in S} \pi(x) N(x) \quad (29)$$

Onde Eq representa o número médio de elementos no sistema, $\pi(x)$ é a probabilidade em regime permanente do estado x da cadeia e $N(x) = i + wi + j + wj + k + wk$.

A Figura 4.20 mostra que o número médio de elementos no sistema do modo A[Full,Omni] do modelo com interferência aumenta com o tamanho do *buffer* e da SNR1. O mesmo acontece para os modos B[Half, Direc] e C[Full, Direc], como podemos observar nas figuras 4.21 e 4.22.

A Figura 4.23 mostra a comparação entre o número médio de elementos no sistema dos modos do modelo com interferência com os modos do modelo sem interferência. Observa-se que os modos do modelo com interferência apresentam maior número médio de elementos no sistema comparado com os modos do modelo sem interferência, como esperado. No modelo com interferência, o modo C[Full,Omni] tem o maior número médio de elemento no sistema.

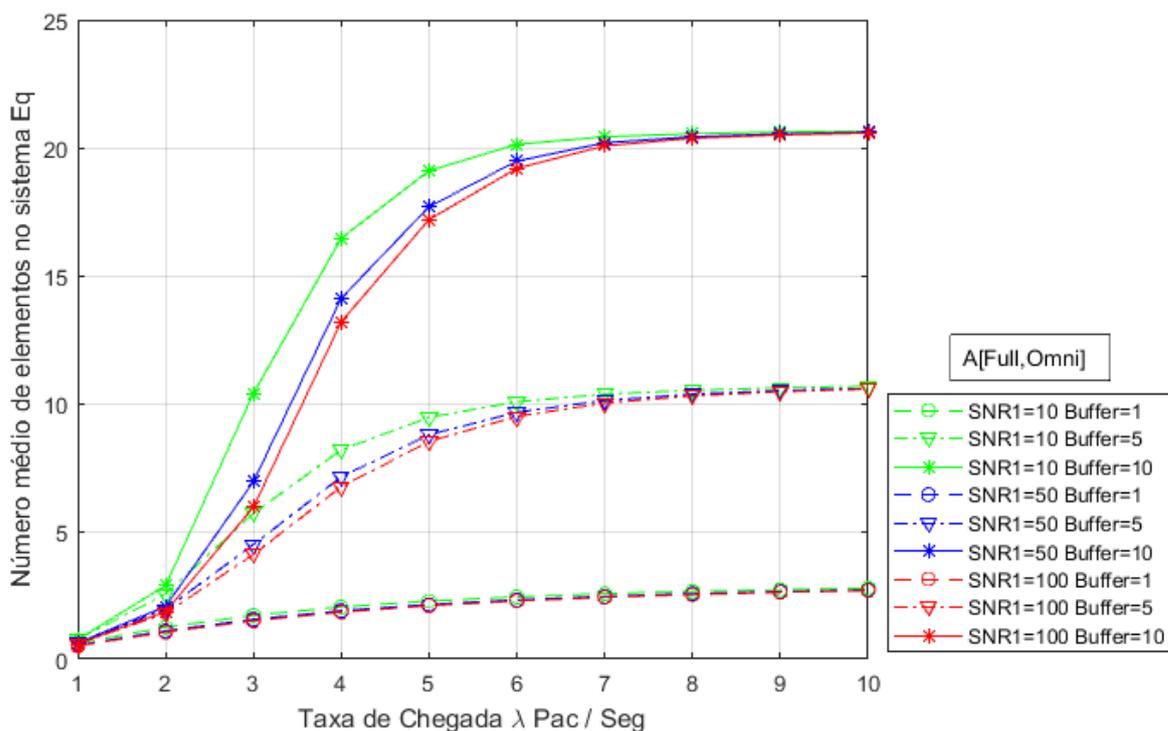


Figura 4.20: Número Médio de Elementos no Sistema Modo A[Full,Omni].

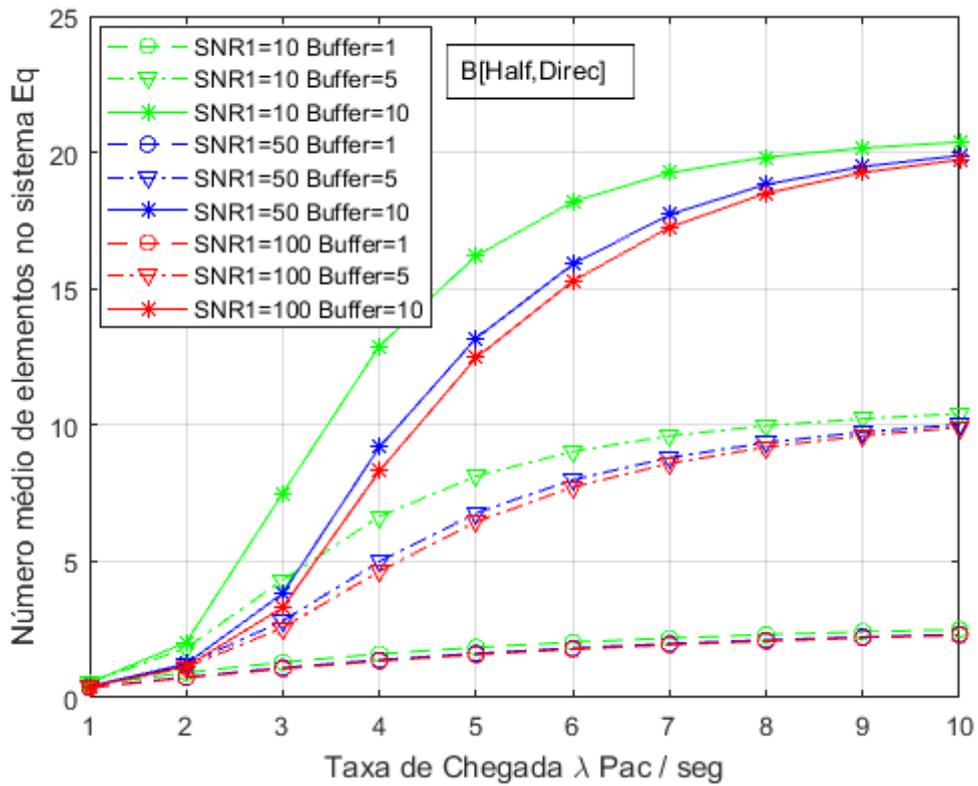


Figura 4.21: Número Médio de Elementos no Sistema Modo B[Half, Direc].

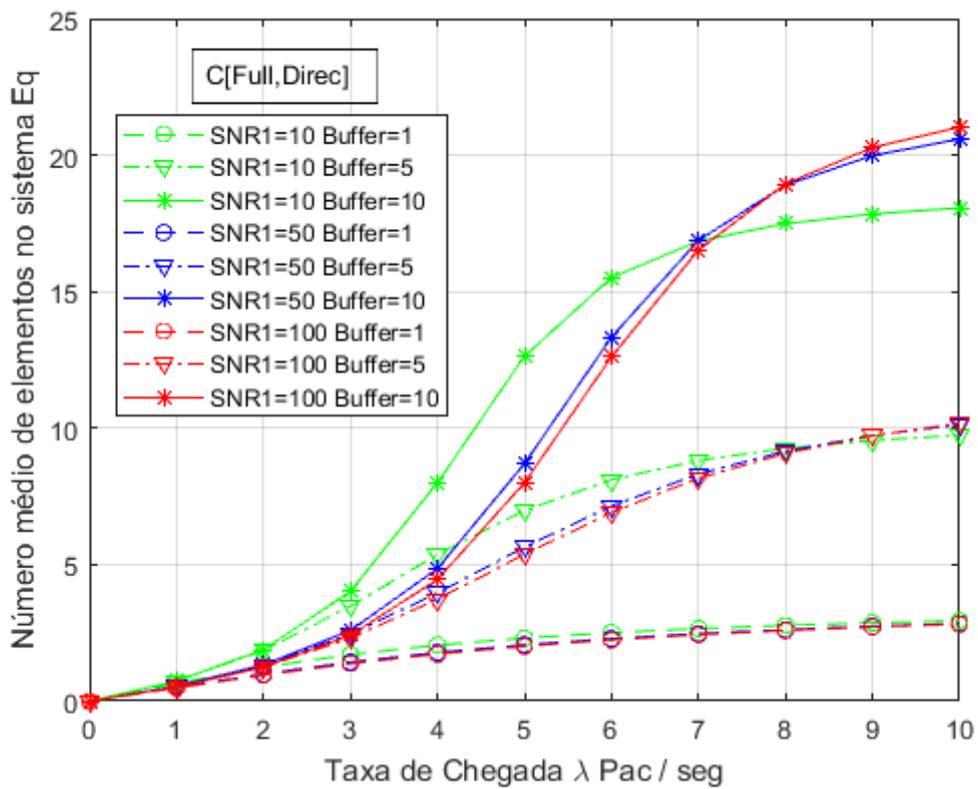


Figura 4.22: Número Médio de Elementos no Sistema Modo C[Full, Direc].

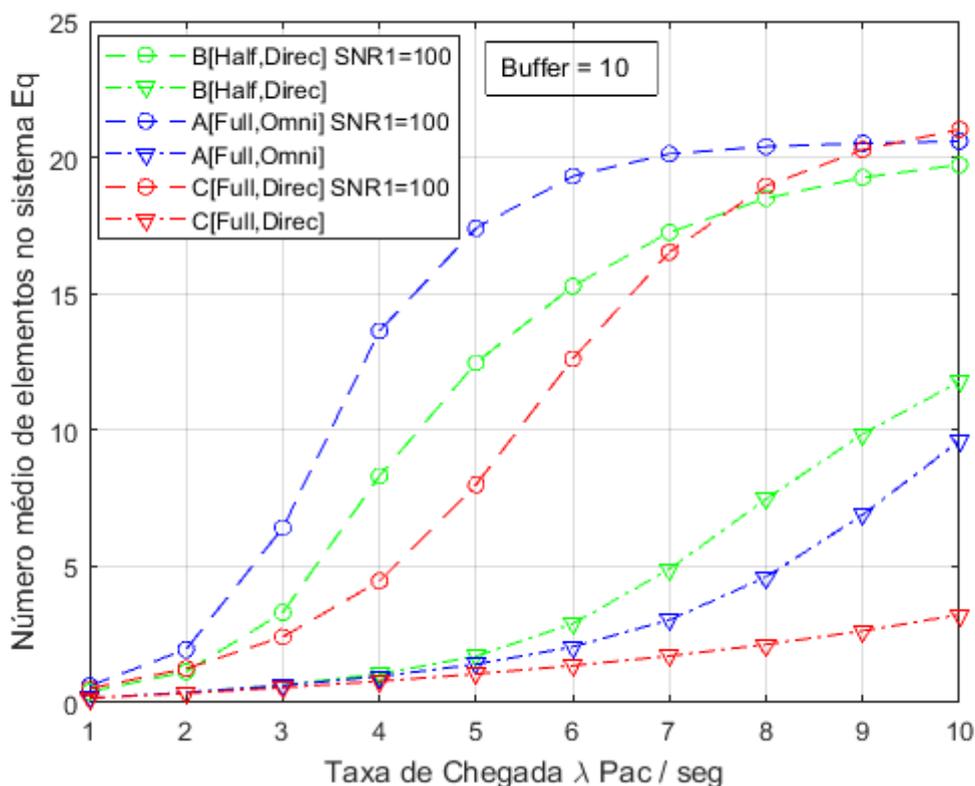


Figura 4.23: Número Médio de Elementos no Sistema com Buffer = 10 e SNR1=100.

4.6 CONCLUSÃO PARCIAL DO MODELO COM BUFFER

Neste Capítulo apresentou-se a análise de desempenho dos modos de operação A[Full,Omni], B[Half,Dirac] e C[Full,Dirac] com cenários com SNR₁=10, 50 e 100 do modelo com *buffer* em uma rede sem fio *multihop* com tráfego em apenas um sentido. Os resultados mostram que a inclusão do *buffer* nos servidores reduziu significativamente as probabilidades de descarte e de bloqueio nos modos com tecnologia de transmissão *full duplex*, melhorando assim o desempenho desses modos. No entanto, o modo com tecnologia de transmissão *half duplex* teve uma melhoria de desempenho muito baixa.

O modo com melhor desempenho em termos de capacidade e vazão nos três cenários é o modo C[Full,Dirac] SNR₁=100. Por outro lado, quando $\lambda \leq 5$, o modo B[Half,Dirac] SNR₁=100 apresentou uma ligeira vantagem comparado ao modo C[Full,Omni] SNR₁=100, pois esse modo utiliza antenas omnidirecionais e, portanto, sofre interferência de todos os lados. Porém, quando $\lambda \geq 5$, o modo C[Full,Omni]

$SNR_1=100$ apresenta melhor desempenho. Foi apresentado também uma comparação entre os modos de operação do modelo sem interferência apresentado em [34] com os modos de operação do modelo com interferência apresentado nesta dissertação. Observou-se, como esperado, que os modos do modelo sem interferência apresentam um desempenho superior aos modos apresentados nesta dissertação, uma vez que este modelo é menos preciso. Percebeu-se também que o modo que faz o uso da tecnologia de transmissão *half duplex* tem desempenho inferior em relação ao modo que utiliza a tecnologia *full duplex* quando se utiliza antenas direcionais.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS

5.1 CONCLUSÕES

De uma forma geral, nesta dissertação foi proposto um modelo Markoviano para analisar o desempenho da tecnologia *full duplex* em uma rede sem fio *multi-hop* com tráfego em apenas um sentido, onde foi analisado o modelamento sem *buffer* nos nós da rede e o modelamento com *buffer* nos nós da rede. Três modos de operação foram analisados com cenários com diferentes SNRs.

Para o modelo sem *buffer* pode-se concluir que o modo B[Half,Direc] com $SNR_1=100$ apresenta o melhor desempenho em termos de capacidade e vazão, pois os modos A[Full,Omni] e C[Full,Direc] com $SNR_1=100$, em comparação com B[Half,Direc] $SNR_1=100$, apresentam uma maior probabilidade de descarte, isso porque a tecnologia *full duplex* permite o envio e recepção simultânea de pacotes e, como não há *buffer* nos servidores, quando há uma recepção no servidor enquanto o mesmo servidor está a transmitir, o pacote recebido é descartado, prejudicando o desempenho desses modos nesse modelo; portanto, podemos dizer que [Half,Direc] com $SNR_1=100$ é o melhor tipo de nó a adotar na rede quando não há *buffer* nos nós..

Para o modelo com *buffer*, verificou-se uma melhora significativa no desempenho dos modos que fazem o uso da tecnologia *full duplex*, (A[Full,Omni] e C[Full,Direc]), ou seja, houve um aumento significativo da capacidade e da vazão desses modos; assim sendo, o melhor tipo de nó a ser adotado na rede nesse modelo é o C[Full,Direc] com $SNR_1=100$ com 5 ou 10 posições de *buffer*. Com isso, podemos concluir que a tecnologia *full duplex* combinadas com antenas direcionais apresenta um desempenho superior à tecnologia *half duplex* combinadas com antenas direcionais.

Pode-se constatar também que a partir de um dado limiar, o tamanho do *buffer* tem pouca influência no desempenho da rede, havendo uma certa saturação, o que pode ser explicado à luz da teoria de filas.

Apresentamos também uma comparação entre o modelo sem interferência, desenvolvido em [31] e [34], com o nosso modelo que leva em consideração a interferência. Como esperado, verificou-se que para os dois modelos (sem *buffer* / com *buffer*), o modelo sem interferência tem melhor desempenho em relação ao modelo

apresentado nesta dissertação, por ser menos preciso. Assim, verifica-se a importância do modelamento com interferência para uma análise mais precisa do desempenho da rede.

5.2 PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS

Para novas pesquisas, pretende-se modelar o sistema considerando que o cancelamento da autointerferência (do inglês: *Self-Interference*) não seja perfeito. Outra projeção seria analisar o atraso de cada modo proposto na rede e o atraso na rede.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan and M. Zorzi, **“Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies”**, in IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 3, pp. 55-61, March 2020 .
- [2] 6G Flagship Project, **“Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence”**, University of Oulu, September 2019.
- [3] Zhao, Y., Zhao, J., Zhai, W., Sun, S., Niyato, D., Lam, **“A Survey of 6G Wireless Communications: Emerging Technologies”** , In: Arai, K. (eds) Advances in Information and Communication. FICC 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1363. Springer, Cham.
- [4] Jose Marcos C Brito., **“Technological trends for 5g networks influence of e-health and iot applications”**, International Journal of E-Health and Medical Communications (IJEHMC), 9(1):1–22, 2018.
- [5] H. Viswanathan and PE Mogensen, **“Communications in the 6G Era”**, in IEEE Access, vol. 8, pp. 57063-57074, 2020.
- [6] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, **“A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies”**, IEEE Access, vol. 7, pp. 175 758–175 768, 2019.
- [7] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, **“Vision, Requirements, and Technology Trend of 6G: How to Tackle the Challenges of System Coverage, Capacity, User Data-Rate and Movement Speed”** IEEE Wireless Communications, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, 2020.
- [8] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, **“6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques”**, IEEE Network, vol. 33, no. 4, pp. 70–75, 2019.
- [9] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, and J. Wang, **“6G Technologies: Key Drivers, Core Requirements, System Architectures, and**

- Enabling Technologies,*” IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 14, no. 3, pp. 18–27, 2019.
- [10] CHANG, K., “*RF and Microwave Wireless Systems*”, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley, 2004. ISBN: 9780471463870.
- [11] K. Eshteivi, G. Kaddoum, B. Selim, and F. Gagnon, “*Impact of co-channel interference and vehicles as obstacles on full-duplex v2v cooperative wireless network*” IEEE Trans. Veh. Technol., pp. 1–1, May 2020.
- [12] Muhammad Sohaib Amjad and Ozgur Gurbuz “*Linear Digital Cancellation with Reduced Computational Complexity for Full-Duplex Radios*”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) 2017.
- [13] Elsayed Ahmed and Ahmed M. Eltawil, “*All-Digital Self-interference Cancellation Technique for Full-duplex Systems*”, IEEE Transactions on Wireless Communications 2015.
- [14] R. Sepanek, M. Hickler e M. Stuenkel, “*In-Band Full-Duplex Self-Interference Canceller Augmented with Bandstop-Configured Resonators*”, in IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS) , 2020, pp. 1199- 1202.
- [15] G. Chen, J. P. Coon, A. Mondal, B. Allen and J. A. Chambers, “*Performance Analysis for Multihop Full-Duplex IoT Networks Subject to Poisson Distributed Interferers*”, in IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 2, pp. 3467-3479, April 2019.
- [16] Min Soo Sim; MinKeun Chung; Dongkyu Kim; Jaehoon Chung; Dong Ku Kim; Chan-Byoung Che, “*Nonlinear Self-Interference Cancellation for Full-Duplex Radios: From Link-Level and System-Level Performance Perspectives*”, IEEE Communications Magazine 2017.
- [17] Ku, Chia-Jou and Shen, Li-Hsiang and Feng, Kai-Tem. “*Reconfigurable Intelligent Surface-Empowered Self-Interference Cancellation for 6G Full-Duplex MIMO Communication Systems*”, arXiv, 2021.

- [18] Karaputugala Madushan Thilina, Hina Tabassum, Ekram Hossain, and Dong In Kim, "**Medium access control design for full duplex wireless systems: challenges and approaches**" IEEE Communication Magazine, 53(5):112-120,2015.
- [19] K. Zhang, B. Zhou, Z. Bu e S. Wang, "**Asymmetric Full-Duplex MAC Protocol Utilizing the Divergence Feature of OAM Beams**", 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall) , 2021
- [20] Q. Liu, G. Qiao, S. Mazhar, S. Liu e Y. Lou, "**A Full-Duplex Directional MAC Framework for Underwater Acoustic Sensor Networks**", no IEEE Sensors Journal ,2022.
- [21] S. Edirisinghe, C. Ranaweera, E. Wong, C. Lim and A. Nirmalathas, "**An Adaptable Contention-free MAC Protocol for Full-duplex Split-plane Optical Wireless Network**", ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications, 2021.
- [22] W. Kim, T. Kim, S. Joo e S. Pack, "**An opportunistic MAC protocol for full duplex wireless LANs**", 2018 International Conference on Information Networking (ICOIN) , 2018.
- [23] MA Rahman, MM Rahman e MA Alim, "**In-band Full-duplex MAC Protocol for Ad Hoc Networks**", 2021 International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (ICECIT) , 2021.
- [24] Ankit kumar Gupta, T.G. Venkatesh, "**Design and analysis of IEEE 802.11 based Full Duplex WLAN MAC protocol**", Computer Networks, Volume 210, 2022.
- [25] Ken Miura and Masaki Bandai, "**Node architecture and MAC protocol for full duplex wireless and directional antennas**" In Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 23rd International Symposium on, pages 369–374.IEEE, 2012.

- [26] Won-Kyung Kim, Jin-Ki Kim, and Jae-Hyun Kim, “*Centralized mac protocol for wireless full duplex networks considering d2d communications*” Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2016 International Conference on, pages 730–732. IEEE, 2016.
- [27] Sanjay Goyal, Pei Liu, Ozgur Gurbuz, Elza Erkip, and Shivendra Panwar, “*A distributed mac protocol for full duplex radio*” In Signals, Systems and Computers, 2013 Asilomar Conference on, pages 788–792. IEEE, 2013.
- [28] Melissa Duarte, Ashutosh Sabharwal, Vaneeet Aggarwal, Rittwik Jana, KK Ramakrishnan, Christopher W Rice, and NK Shankaranarayanan, “*Design and characterization of a full-duplex multiantenna system for wifi networks*” . IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63(3):1160–1177, 2014.
- [29] Kenta Tamaki, H Ari Raptino, Yusuke Sugiyama, Masaki Bandai, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, et al, “*Full duplex media access control for wireless multi-hop networks* ”, In VTC Spring, pages 1–5, 2013.
- [30] Mayank Jain et al, “*Practical, real-time, full duplex wireless*” , In Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking, pages 301–312. ACM, 2011.
- [31] Miguel Francisco, José Brito, Branislav Couceiro, “. *Modeling and Analysis of 5G Full Duplex Wireless Radios,*” ICN International Conference on Networks, 2018.
- [32] Sherin Abdel Hamid, Hossam S Hassanein, and Glen Takahara, “*Introduction to wireless multi-hop networks*”, In Routing for wireless multi-hop networks, pages 1–9. Springer, 2013.
- [33] Torsten Braun, Andreas Kessler, Maria Kihl, Veselin Rakocevic, Vasilios Siris, and Geert Heijenk “*Multihop wireless networks. In Traffic and QoS management in wireless multimedia networks*” pages 201–265. Springer, 2009.
- [34] Miguel Francisco, and José Brito, “. *Performance Analysis of Full Duplex Wireless multi-hop networks,*” pp. 394-408. Springer, Cham, 2019.

Anexo A

Programa no Matlab para o cálculo das probabilidades em regime estacionário

Todos os cálculos feitos nessa dissertação foram feitos no Matlab. A programação para calcular as probabilidades em regime estacionário foi implementado utilizando as equações de transição, que através destas gerou-se a Matriz de estados (ME) e a Matriz de transição (MT), a partir dessas Matrizes calculou-se as probabilidades em regime estacionários. Abaixo toda codificação dos dois modelos apresentados nessa dissertação.

Modelo sem Buffer

```

% Cenário A 'Full Omni' com interferência e SNR=10

function a = cenarioA(ld,mi)
    tb = 0;
    [eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
    [ME,MT] = transicoes(tb,1,eqT,cd);
    a = CalculosMetricas(ME,MT,ld,mi,tb,2);
end

function [e,c] = equacoesT(ld,mi)
    i=0;bi=0;j=0;bj=0;k=0;bk=0;

    SNR1=10;
    SNR2= (4*SNR1)/(4+SNR1);
    capac1=log2(1+SNR1);
    capac2=log2(1+SNR2);
    ma = capac2/capac1*mi;

    % Equacoes/padros de Transicoes
    e = [ i+1,bi,j,bj,k,bk,ld; %1
          i-1,bi,j+1,bj,k,bk,mi; %2
          i,bi,j-1,bj,k+1,bk,mi; %3
          i,bi,j,bj,k-1,bk,mi; %5
          i,bi+1,j,bj,k,bk,ld; %6
          i-1,bi,j,bj,k,bk,mi; %7
          i,bi,j-1,bj,k,bk+1,ma; %8
          i+1,bi-1,j,bj,k-1,bk,mi; %9
          i-1,bi,j+1,bj,k+1,bk-1,mi; %10
          i,bi,j-1,bj,k,bk,mi; %11
          i,bi,j,bj,k-1,bk,ma; %12
          i,bi+1,j,bj,k,bk,ld; %13
          i,bi,j-1,bj,k,bk,mi; %14
          i+1,bi-1,j,bj,k-1,bk,ma]; %15

    % Condições das equacoes/padros de Transicoes
    % 0=0; 1=1; 4=nao vazio; 5=cheio; 6=nao cheio; 9=tanto faz.
    c = [0,0,9,0,0,0; %1
          1,0,0,0,0,0; %2
          0,0,1,0,0,0; %3
          0,0,0,0,1,0; %5
          0,0,0,0,1,0; %6
          1,0,1,0,0,0; %7
          1,0,1,0,0,0; %8
          0,1,0,0,1,0; %9
          1,0,0,0,0,1; %10
          0,0,1,0,1,0; %11
          0,0,1,0,1,0; %12
          0,0,1,0,1,0; %13
          0,1,1,0,1,0; %14
          0,1,1,0,1,0]; %15

end

```

```

% Cenário B 'Half Direc ' com interferência e SNR1=10

function b = cenarioB(ld,mi)

[eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
[ME,MT] = transicoes(tb,l,eqT,cd);
b= CalculosMetricas(ME,MT,ld,mi,tb,3);

end

function [e,c] = equacoesT(ld,mi)
i=0;bi=0;j=0;bj=0;k=0;bk=0;

SNR1=10;
SNR3=(9*SNR1)/(9+SNR1);
capac1=log2(1+SNR1);
capac3=log2(1+SNR3);
moo = capac3/capac1*mi;

%Equacoes/padros de Transicoes
e =[ i+1,bi,j,bj,k,bk,ld; %1
     i-1,bi,j+1,bj,k,bk,mi; %2
     i,bi,j-1,bj,k+1,bk,mi; %3
     i,bi+1,j,bj,k,bk,ld; %4
     i,bi,j,bj,k-1,bk,mi; %5
     i+1,bi,j,bj,k,bk,ld; %6
     i+1,bi-1,j-1,bj,k+1,bk,mi; %7
     i-1,bi,j,bj+1,k,bk,mi; %8
     i,bi,j,bj,k-1,bk,moo; %9
     i,bi,j+1,bj-1,k-1,bk,mi; %10
     i+1,bi,j,bj,k,bk,ld; %11
     i-1,bi,j,bj,k,bk,mi; %12
     i,bi,j,bj,k-1,bk,moo; %13
     i-1,bi,j+1,bj-1,k,bk,mi]; %14

%Condiçoes das equacoes/padros de Transicoes
c =[0,0,0,0,0,0; %1
     1,0,0,0,0,0; %2
     0,0,1,0,0,0; %3
     0,0,1,0,0,0; %4
     0,0,0,0,1,0; %5
     0,0,0,0,1,0; %6
     0,1,1,0,0,0; %7
     1,0,0,0,1,0; %8
     1,0,0,0,1,0; %9
     0,0,0,1,1,0; %10
     0,0,0,1,1,0; %11
     1,0,0,1,1,0; %12
     1,0,0,1,1,0; %13
     1,0,0,1,0,0];%14

end

```

```

% Cenário C 'Full Direc ' com interferência SNR1=10

function c = cenarioC(ld,mi)

[eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
[ME,MT] = transicoes(tb,1,eqT,cd);
c = CalculosMetricas(ME,MT,ld,mi,tb,4);

end

function [e,c] = equacoesT(ld,mi)
i=0;bi=0;j=0;bj=0;k=0;bk=0;

SNR1=10;
SNR2= (4*SNR1)/(4+SNR1);
SNR3=(9*SNR1)/(9+SNR1);
SNR4= (144*SNR1)/(144+36*SNR1+16*SNR1);
capac1=log2(1+SNR1);
capac2=log2(1+SNR2);
capac3=log2(1+SNR3);
capac4=log2(1+SNR4);
ma = capac2/capac1*mi;
moo = capac3/capac1*mi;
mee = capac4/capac1*mi;

% Equacoes/padroses de Transicoes
e =[ i+1,bi,j,bj,k,bk,ld; %1
     i-1,bi,j+1,bj,k,bk,mi; %2
     i,bi,j-1,bj,k+1,bk,mi; %3
     i,bi,j,bj,k-1,bk,mi; %5
     i+1,bi,j,bj,k,bk,ld; %6
     i-1,bi,j,bj,k,bk,mi; %7
     i,bi,j-1,bj,k+1,bk,ma; %8
     i-1,bi,j+1,bj,k,bk,mi; %9
     i,bi,j,bj,k-1,bk,moo; %10
     i,bi,j-1,bj,k,bk,mi; %11
     i,bi,j,bj,k-1,bk,ma; %12
     i+1,bi,j,bj,k,bk,ld; %13
     i-1,bi,j,bj,k,bk,mi; %14
     i,bi,j-1,bj,k,bk,ma; %15
     i,bi,j,bj,k-1,bk,mee]; %16

c =[0,0,9,0,9,0; %1
    1,0,0,0,0,0; %2
    0,0,1,0,0,0; %3
    0,0,0,0,1,0; %5
    0,0,0,0,1,0; %6
    1,0,1,0,0,0; %7
    1,0,1,0,0,0; %8
    1,0,0,0,1,0; %9
    1,0,0,0,1,0; %10
    0,0,1,0,1,0; %11
    0,0,1,0,1,0; %12
    0,0,1,0,1,0; %13
    1,0,1,0,1,0; %14
    1,0,1,0,1,0; %15
    1,0,1,0,1,0]; %16

end

```

%está função testa se os estados cumprem com as condições das equações de %transição.

```
function tc = Testecondicoes(std,cd,tB)
tc=1;
for i=1:6
    if cd(i)==0
        if std(i)~=0
            tc=0;
        end
    else
        if cd(i)==1
            if std(i)~=1
                tc=0;
            end
        else
            if cd(i)==4
                if std(i) <= 0
                    tc=0;
                end
            else
                if cd(i)==5
                    if std(i) ~= tB
                        tc=0;
                    end
                else
                    if cd(i)==6
                        if std(i) == tB
                            tc=0;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
```

%Aqui acontece o retorno do número de um estado da matriz de estados.

```
function e = achaEstado(ME,std)
numE=size(ME);numE=numE(1);
for i=1:numE
    if ME(i,)==std
        e=i;
    end
end
end
```

%está função verifica se um estado existe ou não na matriz de estados

```
function n = novoEstado(ME,std)
numStd=size(ME);numStd=numStd(1);n=1;
for i=1:numStd
    if ME(i,)==std
        n=0;
    end
end
end
```

```

%esta função calcula as transições
function [me,mt] = transicoes(tB,cenario,eqT,cd)

    numEqT=size(eqT);numEqT=numEqT(1);
    ME = [0 0 0 0 0 0]; estado = 1;

    while estado
        for i=1:numEqT
            if precedente( ME(estado,:),cd(i,:),tB)
                std = ME(estado,:)+eqT(i,1:end-1);
                if novoEstado(ME,std);
                    ME=[ME;std];
                end
                indiceEstado = encontraEstado(ME,std);
                MT(estado,indiceEstado)=eqT(i,end);
            end
        end

        numStd=size(ME);numStd=numStd(1);
        if estado < numStd
            estado=estado+1;
        else
            estado = 0;
        end
    end

    me = ME;
    mt = MT;
    %states = statesNames(ME);
    %graphplot(dtmc(MT,'StateNames',states) );
end

% Aqui faz-se o cálculo da Matriz de probabilidade em regime estacionário
function pb = matrizProb(ME,MT)

    numE = size(ME);numE = numE(1);
    %Adicionar o somatorio negativo das linhas na diagonal
    for i=1:numE
        MT(i,i) = - sum(MT(i,:));
    end
    MatrizDiag=MT;
    %Matriz transposta
    MT = MT.';
    %Adicionar a linha de 1s
    MT = [MT;ones(1,numE)];
    %Matriz linha que vai ser multiplicada a Matriz de Transições
    B(numE+1,1) = 1;
    %Probabilidades dos estados
    pb = MT\B;
end

```

```

% Esta função é onde é calculada todas as métricas de desempenho
function calculosmetricas = CalculosMetricas(ME,MT,ld,mi,tb,modo)

Mpb = matrizProb(ME,MT);
numE = size(ME); numE = numE(1);

cp = 0;

SNR1=10;
SNR2= (4*SNR1)/(4+SNR1);
SNR3=(9*SNR1)/(9+SNR1);
SNR4= (144*SNR1)/(144+36*SNR1+16*SNR1);

capac1=log2(1+SNR1);
capac2=log2(1+SNR2);
capac3=log2(1+SNR3);
capac4=log2(1+SNR4);
ma = capac2/capac1*mi;
moo = capac3/capac1*mi;
mee = capac4/capac1*mi;

for i=1:numE
    % cp é a capacidade do sistema
    if ME(i,5)==1;
        cp = cp + ( ME(i,5) * Mpb(i) * mi);
    end
    if ME(i,3)==1 & ME(i,5)==1;
        cp = cp + ( ME(i,5) * Mpb(i) * ma);
    end
    if ME(i,1)==1 & ME(i,5)==1;
        cp = cp + ( ME(i,5) * Mpb(i) * moo);
    end
    if ME(i,1)==1 & ME(i,3)==1 & ME(i,5)==1;
        cp = cp + ( ME(i,5) * Mpb(i) * mee);
    end

    % 'pB' é a probabilidade de bloqueio
    pB= 0;
    for i=1:numE
        pB = pB + ME(i,1) * Mpb(i);
        pB = pB + ME(i,2) * Mpb(i);
    end

    % 'pD' é a Probabilidade de Descarte
    pD = 1 - ( cp / (ld*(1-pB)) );

    vazao = cp/ld;

    % Eq representa o número médio de elementos no sistema.
    Eq = 0;
    for i=1:numE
        Eq = Eq + (sum(ME(i,:) * Mpb(i)));
    end

    lengedas = [' pB ',' pD ',' cp ',' vazao ',' Eq '];
    calculosmetricas = [pB,pD,cp,vazao,Eq,Eq];

end

```

Modelo com Buffer

```

% Cenário A Full Omni com Interferência e SNR1=10

function al = cenarioA1(ld,mi,tb)

    [eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
    [ME,MT] = transicoes(tb,2,eqT,cd);
    al = calculosmetricas1(ME,MT,ld,mi,tb,2);
end

function [e,c] = equacoesT(ld,mi)
    i=0;bi=0;j=0;bj=0;k=0;bk=0;

    % Calculo da taxa com interferência
    SNR1=10;
    SNR2= (4*SNR1)/(4+SNR1);
    capa1=log2(1+SNR1);
    capa2=log2(1+SNR2);
    ma = capa2/capa1*mi;
    % Equacoes/padrees de Transicoes
    e = [ i+1,bi,j,bj,k,bk,ld;      %1
          i,bi+1,j,bj,k,bk,ld;    %2
          i,bi+1,j,bj,k,bk,ld;    %3
          i-1,bi,j+1,bj,k,bk,mi;  %4
          i,bi-1,j+1,bj,k,bk,mi;  %5
          i,bi,j-1,bj,k+1,bk,mi;  %6
          i-1,bi,j,bj+1,k,bk,mi;  %7
          i,bi,j-1,bj,k,bk+1,ma;  %8
          i,bi,j-1,bj,k,bk+1,mi;  %9
          i,bi,j,bj,k-1,bk,mi;    %10
          i,bi,j,bj,k-1,bk,ma;    %11
          i,bi-1,j,bj+1,k,bk,mi;  %12
          i,bi,j,bj-1,k+1,bk,mi;  %13
          i+1,bi-1,j,bj,k-1,bk,mi; %14
          i+1,bi-1,j,bj,k-1,bk,ma; %15
          i-1,bi,j,bj,k,bk,mi;    %16
          i,bi,j,bj-1,k,bk+1,ma;  %17
          i,bi,j,bj-1,k,bk+1,mi;  %18
          i-1,bi,j+1,bj,k+1,bk-1,mi;%19
          i,bi-1,i,bj,k,bk,mi;    %20
    ];

```

```

i-1,bi,j,bj+1,k+1,bk-1,mi;%21
i,bi,j-1,bj,k,bk,ma; %22
i,bi,j-1,bj,k,bk,mi; %23
i,bi,j,bj,k,bk-1,mi; %24
i,bi,j,bj,k,bk-1,ma; %25
i-1,bi,j,bj,k+1,bk-1,mi; %26
i,bi,j,bj-1,k,bk,ma; %27
i,bi,j,bj-1,k,bk,ma;l; %28
%Condicoes das equacoes/padros de Transicoes
%0=0; 1=1; 4=nao vazio; 5=cheio; 6=nao cheio; 9=tanto faz.
c =[0,0,9,9,0,0; %1
1,6,9,9,0,9; %2
0,6,9,9,1,9; %3
1,0,0,0,0,0; %4
1,4,0,0,0,0; %5
0,0,1,0,0,0; %6
1,0,1,6,0,0; %7
1,9,1,0,0,6; %8
0,9,1,0,1,6; %9
0,0,9,9,1,0; %10
0,0,1,9,1,0; %11
1,4,1,6,0,0; %12
0,0,1,4,0,0; %13
0,4,9,9,1,9; %14
0,4,1,0,1,9; %15
1,0,1,5,0,0; %16
1,9,1,4,0,6; %17
0,9,1,4,1,6; %18
1,9,0,0,0,4; %19
1,4,1,5,0,0; %20
1,9,1,6,0,4; %21
1,9,1,0,0,5; %22
0,9,1,0,1,5; %23
0,0,9,9,1,4; %24
0,0,1,9,1,4; %25
1,9,1,5,0,4; %26
0,9,1,4,1,5; %27
1,9,1,4,0,5;l;%28
end

```

```

% Cenário B Half Direc com Interferência e SNR1=10

function bl = cenarioB1(ld,mi,tb)

[eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
[ME,MT] = transicoes(tb,3,eqT,cd);
bl = calculosmetricas1(ME,MT,ld,mi,tb,3);
end

function [e,c] = equacoesT(ld,mi)
i=0;bi=0;j=0;bj=0;k=0;bk=0;

% Calculo da taxa com interferência
SNR1=10;
SNR3=(9*SNR1)/(9+SNR1);
capac1=log2(1+SNR1);
capac3=log2(1+SNR3);
moo = capac3/capac1*mi;

% Equacoes/padros de Transicoes
e = [ i+1,bi,j,bj,k,bk,ld; %1
      i+1,bi,j,bj,k,bk,ld; %2
      i,bi+1,j,bj,k,bk,ld; %3
      i-1,bi,j+1,bj,k,bk,mi; %4
      i,bi+1,j,bj,k,bk,ld; %5
      i,bi,j-1,bj,k+1,bk,mi; %6
      i+1,bi-1,j-1,bj,k+1,bk,mi;%7
      i,bi,j,bj,k-1,bk,mi; %8
      i,bi,j,bj,k-1,bk,moo; %9
      i,bi,j,bj,k-1,bk,moo; %10
      i-1,bi,j,bj+1,k,bk,mi; %11
      i,bi-1,j,bj+1,k,bk,mi; %12
      i,bi,j+1,bj-1,k-1,bk,mi; %13
      i-1,bi,j,bj,k,bk,mi; %14
      i,bi-1,j,bj,k,bk,mi]; %15

% Condições das equacoes/padros de Transicoes
% 0=0; 1=1; 4=nao vazio; 5=cheio; 6=nao cheio; 9=tanto faz.
c = [0,0,0,0,0,0; %1
      0,0,0,9,1,0; %2
      1,6,0,9,9,0; %3
      1,9,0,9,0,0; %4
      0,6,1,9,0,0; %5
      0,0,1,9,0,0; %6
      0,4,1,9,0,0; %7
      0,9,0,0,1,0; %8
      1,9,0,0,1,0; %9
      1,9,0,4,1,0; %10
      1,0,0,6,1,0; %11
      1,4,0,6,1,0; %12
      0,0,0,4,1,0; %13
      1,0,0,5,1,0; %14
      1,4,0,5,1,0];%15

end

```

```

% Cenário C Full Direc com Interferência e SNR1=10

function c1 = cenarioC1(ld,mi,tB)
[eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
[ME,MT] = transicoes(tB,4,eqT,cd);
c1 = calculosmetricas1(ME,MT,ld,mi,tB,4);
end

function [e,c] = equacoesT(ld,mi)
i=0;bi=0;j=0;bj=0;k=0;bk=0;

% Calculo das taxas com interferência
SNR1=10;
SNR2= (4*SNR1)/(4+SNR1);
SNR3=(9*SNR1)/(9+SNR1);
SNR4= (144*SNR1)/(144+36*SNR1+16*SNR1);
capac1=log2(1+SNR1);
capac2=log2(1+SNR2);
capac3=log2(1+SNR3);
capac4=log2(1+SNR4);
ma = capac2/capac1*mi;
moo = capac3/capac1*mi;
mee = capac4/capac1*mi;

% Equacoes/padrees de Transicoes
e =[ i+1,bi,j,bj,k,bk,ld; %1
     i,bi+1,j,bj,k,bk,ld; %2
     i-1,bi,j+1,bj,k,bk,mi; %3
     i,bi,j-1,bj,k+1,bk,mi; %4
     i,bi,j-1,bj,k+1,bk,ma; %5
     i-1,bi,j,bj+1,k,bk,mi; %6
     i,bi,j,bj,k-1,bk,mi; %7
     i,bi,j,bj,k-1,bk,moo; %8
     i,bi,j,bj,k-1,bk,ma; %9
     i,bi,j,bj,k-1,bk,mee; %10
     i,bi-1,j,bj+1,k,bk,mi %11
     i,bi,j,bj-1,k+1,bk,mi; %12
     i,bi,j,bj-1,k+1,bk,ma; %13
     i-1,bi,i,bi,k,bk,mi; %14

```

```

i,bi-1,j+1,bj,k,bk,mi; %15
i,bi,j-1,bj,k,bk+1,mi; %16
i,bi,j-1,bj,k,bk+1,ma; %17
i,bi-1,j,bj,k,bk,mi; %18
i,bi,j,bj,k,bk-1,mi; %19
i,bi,j,bj,k,bk-1,moo; %20
i,bi,j,bj,k,bk-1,ma; %21
i,bi,j,bj,k,bk-1,mee; %22
i,bi,j,bj-1,k,bk+1,mi; %23
i,bi,j,bj-1,k,bk+1,ma; %24
i,bi,j-1,bj,k,bk,mi; %25
i,bi,j-1,bj,k,bk,ma; %26
i,bi,j,bj-1,k,bk,mi; %27
i,bi,j,bj-1,k,bk,ma; %28

%Condiçoes das equacoes/padrees de Transicoes
%0=0; 1=1; 4=nao vazio; 5=cheio; 6=nao cheio; 9=tanto faz.
c =[0,0,9,9,9,9; %1
1,6,9,9,9,9; %2
1,0,0,0,9,9; %3
9,9,1,0,0,0; %4
1,9,1,0,0,0; %5
1,0,1,6,9,9; %6
9,9,9,9,1,0; %7
1,9,9,9,1,0; %8
9,9,1,9,1,0; %9
1,9,1,9,1,0; %10
1,4,1,6,9,9; %11
9,9,1,4,0,0; %12
1,9,1,4,0,0; %13
1,0,1,5,9,9; %14
1,4,0,0,9,9; %15
9,9,1,0,1,6; %16
1,9,1,0,1,6; %17
1,4,1,5,9,9; %18
9,9,9,9,1,4; %19
1,9,9,9,1,4; %20
9,9,1,9,1,4; %21
1,9,1,9,1,4; %22
9,9,1,4,1,6; %23
1,9,1,4,1,6; %24
9,9,1,0,1,5; %25
1,9,1,0,1,5; %26
9,9,1,4,1,5; %27
1,9,1,4,1,5];%28

end

```

`%Esta função responsável pelos calculos das transições do modelo com buffer`

```
function [me,mt] = transicoes(tB,cenario,eqT,cd)

    numEqT=size(eqT);numEqT=numEqT(1);
    ME = [0 0 0 0 0 0]; estado = 1;
    numEstados = 1;

    while estado
        for i=1:numEqT
            if achaEstado( ME(estado,:),cd(i,:),tB)
                std = ME(estado,:)+eqT(i,1:end-1);
                estadoDestino = novoEstado(ME,std,numEstados);
                if estadoDestino == 0
                    ME=[ME;std];
                    numEstados = numEstados +1;
                    MT(estado,numEstados)=eqT(i,end);
                else
                    MT(estado,estadoDestino)=eqT(i,end);
                end
            end
        end

        if estado < numEstados
            estado=estado+1;
        else
            estado = 0;
        end

    end

    me = ME;
    mt = MT;

end
```

`%Calculos da Matriz de probabilidade em regime estacionario`

```
function pb = matrizProb(ME,MT)

    numE = size(ME);numE = numE(1);
    %Adicionar o somatorio negativo das linhas na diagonal
    for i=1:numE
        MT(i,i) = - sum(MT(i,:));
    end
    Diagonal=MT
    %Matriz transposta
    MT = MT.';
    %Adicionar a linha de uns no final da matriz
    MT = [MT;ones(1,numE)];
    %Matriz das constantes
    B(numE+1,1) = 1;
    %Probabilidades dos estados
    pb = MT\B;

end
```

```

% Cálculos das Métricas de desempenho Modelo com Buffer

function calculosmetricas1 = Calculos1(ME,MT,ld,mi,tb,modo)

Mpb = matrizProb(ME,MT);
numE = size(ME); numE = numE(1);
MatrizDeEstados=ME
MatrizDeTransicao=MT

cp = 0; pB = 0; Eq = 0;

%Calculo das taxas com interferência
SNR1=10;
SNR2= (4*SNR1)/(4+SNR1);
SNR3=(9*SNR1)/(9+SNR1);
SNR4= (144*SNR1)/(144+36*SNR1+16*SNR1);
capac1=log2(1+SNR1);
capac2=log2(1+SNR2);
capac3=log2(1+SNR3);
capac4=log2(1+SNR4);
ma = capac2/capac1*mi;
moo = capac3/capac1*mi;
mee = capac4/capac1*mi;

for i=1:numE

    if ME(i,5)==1;
        cp = cp + ( ME(i,5) * Mpb(i) * mi);
    end
    if ME(i,3)==1 & ME(i,5)==1;
        cp = cp + ( ME(i,5) * Mpb(i) * ma);
    end
    if ME(i,1)==1 & ME(i,5)==1;
        cp = cp + ( ME(i,5) * Mpb(i) * moo);
    end
    if ME(i,1)==1 & ME(i,3)==1 & ME(i,5)==1;
        cp = cp + ( ME(i,5) * Mpb(i) * mee);
    end

    if ME(i,2)==tb;
        pB = pB + Mpb(i);
    end

    Eq = Eq + (sum(ME(i,:) * Mpb(i)));
end

pD = 1 - ( cp / (ld*(1-pB)));

vazao = cp/ld;

legendas = ['pB ', ' pD ', ' cp ', ' vazao ', ' Eq '];
calculosmetricas1 = [pB,pD,cp,vazao,Eq];

end

```