Dissertação de Mestrado

Inatel

Instituto Nacional de Telecomunicações

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

Miguel Sílvio André Francisco

Fevereiro / 2019

INSTITUTO NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES

INATEL

MESTRADO EM TELECOMUNICAÇÕES

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

MIGUEL SÍLVIO ANDRÉ FRANCISCO

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

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ MARCOS CÂMARA BRITO

Santa Rita do Sapucaí - MG

2019

Francisco, Miguel Sílvio André
F819u
Um Modelo Markoviano para Análise de Desempenho de Redes Multi-Hop Full Duplex. / Miguel Sílvio André Francisco. – Santa Rita do Sapucaí, 2019.
109 p.

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

1. Full Duplex 2. 5G 3. Cadeias de Markov 4. Analise de Desempenho 5. Redes sem fio Multi-Hop 6. Antenas Direcionais 7. Antenas Omni-Direcionais 8. Mestrado em Telecomunicações. I. Brito, José Marcos Câmara. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

Ficha Catalográfica elaborada pelo Bibliotecário da Instituição
CRB6-2718 – Paulo Eduardo de Almeida

Biblioteca "Ministro Olavo Bilac Pinto"

FOLHA DE APROVAÇÃO

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

_____

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

_____

Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra
INATEL

_____

Prof. Dr. Paulo Cardieri
FEEC - UNICAMP

_____

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

Inatel

Instituto Nacional de Telecomunicações

ATA Nº 176: DEFESA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TELECOMUNICAÇÕES – ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA ELÉTRICA

Autor: Miguel Silvio André Francisco

No dia 07 de fevereiro de 2019, às 10h, no auditório Aureliano Chaves do Inatel, realizou-se a defesa de dissertação de mestrado em Telecomunicações, cuja área de concentração é Engenharia Elétrica, do Engenheiro Miguel Silvio André Francisco, intitulada "Um Modelo Markoviano para Análise de Desempenho de Redes Multi-Hop Full Duplex". A banca julgadora foi composta por: Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito do Inatel, presidente, Prof. Dr. Paulo Cardieri da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp e Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra do Inatel. Estiveram presentes, além dos componentes da banca e do mestrando, professores, funcionários, alunos do Inatel e outras pessoas. O presidente deu início aos trabalhos, anunciando ser esta a centésima septuagésima quarta 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 reuniram-se em caráter reservado 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 aos presentes 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, 07 de fevereiro de 2019.

Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

Prof. Dr. Paulo Cardieri

Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra

Humildade é reconhecer … se redimir … e melhorar.

MG.

Agradecimentos

Agradeço a Deus Pai, Filho e Espírito Santo. A minha mãe do céu Maria Santíssima e a minha mãe da terra Carlota Miguel André Neto Francisco. A toda minha família da cidade de Santa Rita do Sapucaí (Brasil) e àqueles de meu país de origem, Angola.

Em especial, agradeço ao meu tio Antônio Miguel André, a Elen Gonçalves dos santos, ao Mestre Branislav Edgar Couceiro Feijó que me auxiliou bastante na pesquisa, ao meu orientador Professor Dr. José Marcos Câmara Brito, a Gisele Moreira dos Santos e Aline do Couto Pereira Viera.

Sumário

Lista de Figuras....vi
Lista de Tabelas....viii
Lista de Abreviaturas e Siglas....ix
Lista de Símbolos....x
Resumo....xi
Abstract....xii
Capítulo 1 -Introdução....1
1.1-Comunicação Full Duplex....2
1.1.1 -Transmissão FD Bidirecional....3
1.1.2 -Transmissão FD Baseada no Destino....3
1.1.3 -Transmissão FD Baseada na Origem....4
1.2-Desafios para o Full Duplex....4
1.3-Motivação e Contribuições da Dissertação....5
1.4-Estrutura da Dissertação....6
Capítulo 2 -Redes Sem Fio Multi-Hop....7
2.1-Redes Multi-Hop....7
2.2-Cenário da Rede....7
2.3-Modos de Operação da Rede....8
2.3.1 -Modo A[Half,Omni]....9
2.3.2 -Modo B[Full,Omni]....10
2.3.3 -Modo D[Full,Direc]....11
2.3.4 -Modo C[Half,Direc]....12
Capítulo 3 -Modelo Markoviano para Análise de Desempenho....13
3.1-Análise da Cadeia de Markov de Tempo Contínuo....13
3.2-Modelo Sem Buffer....14
3.2.1 -Modo A[Half,Omni]....14
3.2.1.1 -Diagrama de Transição de Estados....15
3.2.2 -Modo B[Full,Omni]....17
3.2.2.1 -Diagrama de Transição de Estados....17
3.2.3 -Modo C[Half,Direc]....21
3.2.3.1 -Diagrama de Transição de Estados....21
3.2.4 -Modo D[Full,Direc]....25
3.2.4.1 -Diagrama de Transição de Estados....25
3.3-Matriz de Transição e Probabilidades em Regime Estacionário....29
3.4-Métricas de Desempenho para o Modelo sem Buffer....32
A)Probabilidade de Bloqueio....32
B)Capacidade....33
C)Probabilidade de Descarte....34
D)Vazão....35
E)Número Médio de Elementos no Sistema....36
3.5-Conclusões do Modelo sem Buffer....37
3.6-Modelo com Buffer....38
3.6.1 -Modo A[Half,Omni]....38
3.6.1.1 -Diagrama de Transição de Estados....38

3.6.2 -Modo B[Full,Omni]....40
3.6.2.1 -Diagrama de Transição de Estados....40
3.6.3 -Modo C[Half,Direc]....44
3.6.3.1 -Diagrama de Transição de Estados....44
3.6.4 -Modo D[Full,Direc]....47
3.6.4.1 -Diagrama de Transição de Estados....47
3.6.5 -Diagramas de Transição de Estados com Buffer = 1....50
3.6.5.1 -Modo A[Half,Omni]....50
3.6.5.2 -Modo B[Full,Omni]....53
3.6.5.3 -Modo C[Half,Direc]....54
3.7-Métricas de Desempenho para o Modelo com Buffer....55
A)Probabilidade de Bloqueio....55
B)Probabilidade de Descarte....60
C)Capacidade....65
D)Vazão....70
E)Número Médio de Elementos no Sistema....75
3.8-Conclusões do Capítulo....80
Capítulo 4 -Conclusão e Trabalhos Futuros....81
4.1-Trabalhos Futuros....82
Anexo A. Calculo das Probabilidades em Regime Estacionário....83
Modelo sem Buffer....83
Modelo com Buffer....89

Lista de Figuras

Figura 1.Bi-Directional Full Duplex....3
Figura 2.Destination Based Full Duplex Transmission....4
Figura 3.Source Based Full Duplex Transmission....4
Figura 4: Rede sem fio multi-hop....7
Figura 5: Modo de operação A[Half,Omni]....10
Figura 6: Modo de operação B[Full,Omni]....11
Figura 7: Modo de operação D[Full,Omni]....11
Figura 8: Modo de operação C[Half,Direc]....12
Figura 9: Modo A[Half,Omni] diagrama de estados sem buffer....16
Figura 10: Modo B[Full,Omni] diagrama de estados sem buffer....20
Figura 11: Modo C[Half,Direc] diagrama de estados sem buffer....24
Figura 12: Modo D[Full,Direc] diagrama de estados sem buffer....27
Figura 13: Conjunto de estados possíveis, modoA[Half,Omni]....30
Figura 14: Matriz de transição, modoA[Half,Omni]....30
Figura 15: Elementos da diagonal principal....30
Figura 16: Probabilidade em regime estacionário....30
Figura 17: Probabilidade de bloqueio....32
Figura 18: Capacidade do sistema....33
Figura 19: Probabilidade de descarte....34
Figura 20: Vazão....35
Figura 21: Número médio de elementos no sistema....36
Figura 22: Diagrama de estados modoA[Half,Omni], buffer=1....48
Figura 23: Diagrama de estados modoB[Full,Omni], buffer=1....49
Figura 24: Diagrama de estados modoC[Half,Direc], buffer=1....50
Figura 25: Modo A[Half,Omni] probabilidade de bloqueio....52
Figura 26: Modo B[Full,Omni] probabilidade de bloqueio....52
Figura 27: Modo C[Half,Direc] probabilidade de bloqueio....53
Figura 28: Modo D[Full,Direc] probabilidade de bloqueio....53
Figura 29: Probabilidade de bloqueio, buffer 1....54
Figura 30: Probabilidade de bloqueio, buffer 5....54
Figura 31: Probabilidade de bloqueio, buffer 10....55
Figura 32: Probabilidade de bloqueio, buffer 20....55
Figura 33: Modo A[Half,Omni] probabilidade de descarte....57
Figura 34: Modo B[Full,Omni] probabilidade de descarte....57
Figura 35: Modo C[Half,Direc] probabilidade de descarte....58
Figura 36: Modo D[Full,Direc] probabilidade de descarte....58
Figura 37: Probabilidade de descarte, buffer 1....59
Figura 38: Probabilidade de descarte, buffer 5....59
Figura 39: Probabilidade de descarte, buffer 10....60
Figura 40: Probabilidade de descarte, buffer 20....60
Figura 41: Modo A[Half,Omni] Capacidade do sistema....62
Figura 42: Modo B[Full,Omni] Capacidade do sistema....62
Figura 43: Modo C[Half,Direc] Capacidade do sistema....63
Figura 44: Modo D[Full,Direc] Capacidade do sistema....63

Figura 45: Capacidade do sistema, buffer 1.....64
Figura 46: Capacidade do sistema, buffer 5.....64
Figura 47: Capacidade do sistema, buffer 10.....65
Figura 48: Capacidade do sistema, buffer 20.....65
Figura 49: Modo A[Half,Omni] Vazão.....67
Figura 50: Modo B[Full,Omni] Vazão.....67
Figura 51: Modo C[Half,Direc] Vazão.....68
Figura 52: Modo D[Full,Direc] Vazão.....68
Figura 53: Vazão, buffer 1.....69
Figura 54: Vazão, buffer 5.....69
Figura 55: Vazão, buffer 10.....70
Figura 56: Vazão, buffer 20.....70
Figura 57: Modo A[Half,Omni] número médio de elementos no sistema.....72
Figura 58: Modo B[Full,Omni] número médio de elementos no sistema.....72
Figura 59: Modo C[Half,Direc] número médio de elementos no sistema.....73
Figura 60: Modo D[Full,Direc] número médio de elementos no sistema.....73
Figura 61: Número médio de elementos no sistema, buffer 1.....74
Figura 62: Número médio de elementos no sistema, buffer 5.....74
Figura 63: Número médio de elementos no sistema, buffer 10.....75
Figura 64: Número médio de elementos no sistema, buffer 20.....75

Lista de Tabelas

Tabela 1: Modo A[Half,Omni] equações de transição sem buffer.....17
Tabela 2: Modo B[Full,Omni] equações de transição sem buffer.....21
Tabela 3: Modo C[Full,Direc] equações de transição sem buffer.....24
Tabela 4: Modo D[Full,Direc] equações de transição sem buffer.....28

Lista de Abreviaturas e Siglas

5G	- Quinta Geração de redes moveis.
BFD	- *Bi-Directional FD.*
CMTC	- Cadeias de Markov de Tempo Continuo.
D2D	- *Device-To-Device.*
DBTM	- *Destination-Based Transmission Mode*.
FD	- *Full Duplex.*
IBFD	- *In-Band Full Duplex.*
MAC	- *Medium Access Control.*
MANETs	- *Mobile Ad-Hoc Networks.*
RS	- Receptor Secundário.
RP	- Receptor Primário.
STR	- *Simultaneous Transmission and Reception.*
SI	- *Self-Interference.*
SDTM	- *Source-Based Transmission Mode.*
TP	- Transmissor Primário.
TS	- Transmissor Secundário.
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.

D - 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.

Ps - Probabilidade de Sucesso.

Q - Matriz de transição.

S - Conjunto de estados possíveis.

Th - Vazão.

wi - Representa o número de pacotes em espera no nó S.

wj - Representa o número de pacotes em espera no nó 1.

wk - Representa o número de pacotes em espera no nó 2.

λ - Taxa média de chegada de pacotes.

μ - Taxa de serviço.

$\pi(x)$ - Probabilidade em regime estacionário.

Resumo

Várias tecnologias estão sendo consideradas para fazer parte do novo padrão de redes de comunicações moveis, as redes 5G. Dentre estas tecnologias, tem-se a transmissão *Full Duplex*, tema deste trabalho.

A transmissão *Full Duplex* é uma tecnologia que permite um nó transmitir e receber ao mesmo tempo na mesma banda de frequência, aumentando consideravelmente a capacidade da rede. Tecnologias como esta são de grande importância para o 5G, pois os requisitos de capacidade e eficiência espectral são cada vez maiores para estas redes.

Nesta dissertação desenvolveu-se um modelo matemático para analisar o desempenho da tecnologia de transmissão *full duplex* e *half duplex*, combinadas a antenas omnidirecionais e direcionais, em uma rede *multi-hop* sem fio com tráfego em apenas um sentido.

Desenvolveu-se um modelo analítico de cadeias de Markov de tempo contínuo multidimensionais para modelar o sistema e apresentar as seguintes métricas de desempenho: probabilidade de bloqueio, probabilidade de descarte, capacidade do sistema, vazão e número médio de elementos no sistema.

Com base nos resultados observou-se que em uma rede *multi-hop* sem fio com tráfego em apenas um sentido, a tecnologia *half duplex* utilizada com antenas direcionais tem o melhor desempenho em termos de capacidade e vazão, em um cenário onde não existe *buffer* nos nós da rede. No entanto, quando se introduz *buffer* nos nós, a tecnologia *full duplex* utilizada com antenas direcionais tem um desempenho muito superior à tecnologia *half duplex*, chegando quase ao triplo da capacidade e vazão.

Palavras Chaves: 5G, redes multi-hop, comunicação *full duplex*, análise de desempenho, processos de Markov, antenas direcionais, antenas omnidirecionais.

Abstract

Several technologies are being considered to be part of the new standard of mobile communications networks, 5G. Among these technologies, we have the Full Duplex transmission, theme of this work.

Full Duplex transmission is a technology that allows a node to transmit and receive at the same time in the same frequency band, greatly increasing network capacity. Technologies like this are of great importance for the 5G, because spectral efficiency and capacity requirements are increasing for these networks.

In this dissertation a mathematical model was developed to analyze the performance of full duplex and half duplex transmission technology, combined with omnidirectional and directional antennas, in a wireless multi-hop network with traffic in only one-way.

An analytical model of multidimensional continuous-time Markov chains was developed to model the system and to present the following performance metrics: blocking probability, drop probability, system capacity, throughput and average number of elements in the system.

Based on the results, it was observed that in a wireless multi-hop network with traffic in only one-way, the half-duplex technology used with directional antennas has the best performance in terms of capacity and throughput in a scenario where there is no buffer on the network nodes. However, when introducing buffer to the nodes, the full duplex technology used with directional antennas performs much better than half duplex technology, nearly triple the capacity and throughput.

Keywords: 5G, multi-hop network, full duplex communications, performance analysis, Markovian models, directional antennas, omni-directional antennas.

Capítulo 1 - Introdução

O crescimento exponencial do número de usuários e do tráfego de dados, as exigências cada vez maiores em termos de maior vazão, menor latência, mais eficácia no uso de recursos como espectro, energia e outros, desencadearam o estudo da quinta geração de redes de comunicações moveis celulares (5G)[1].

Aplicações como *streaming* de vídeo, serviços de *cloud*, Internet das coisas (IoT), jogos em rede, redes sociais, *Machine-to-machine* (M2M) são apenas algumas que estão na base desse crescimento exponencial do tráfego [2].

O 5G é o conjunto de requisitos e tecnologias que servem de referência ao desenvolvimento e implementação da nova geração de redes sem fio de comunicações móveis, que vai suceder a geração atual, 4G. O 5G começou a ser padronizado em 2014 e tem a previsão de entrar em operação em 2020 [3]. Desde o surgimento do 1G na década de 80, as redes de comunicações móveis evoluíram drasticamente em termos de requisitos, tecnologias, serviços e conceitos. Saímos de redes centradas simplesmente no tráfego de voz para o enorme mundo do tráfego de dados, que vem revolucionando as comunicações móveis, permitindo uma nova e infinita gama de serviços, tecnologias e oportunidades.

Dentre os requisitos do 5G destaca-se a capacidade, onde se estima que o 5G possa atingir uma capacidade 1000 vezes superior à do 4G [4]. Outros requisitos, extraídos de [5] são:

- Latência de 1ms.
- Pico de taxa de dados de 20 Gbps.
- Mobilidade de 500 km/h.
- Eficiência espectral 3 vezes superior à do 4G.
- Economia de energia da rede 100 vezes superior à do 4G.
- Número de conexões simultâneas de 1.000.000 conexões / km^2.

Muitos pesquisadores por todo mundo procuram desenvolver novas tecnologias e aperfeiçoar as existentes para que o 5G possa atingir os requisitos especificados, uma das tendências tecnológicas para o 5G, objeto de estudo desta

dissertação, é a comunicação *full duplex*. Outras tendências tecnológicas previstas para o 5G, extraídas de [3] são:

- Redes ultra densas com uso de *Small Cells*.
- Novas formas de onda.
- *Coordinated multipoint*.
- Uso de ondas milimétricas.
- *Massive MIMO* e *3D MIMO*.
- Rádio cognitivo.
- Técnicas de múltiplo acesso não ortogonais.
- Comunicação dispositivo a dispositivo.
- *Softwarization and Cloud Radio Access Network*.

A seguir tem-se uma descrição detalhada da tecnologia *Full Duplex* em redes sem fio.

1.1- Comunicação *Full Duplex*

In-Band Full Duplex (IBFD), *Simultaneous Transmission and Reception* (STR), ou simplesmente *Full Duplex* (FD), é uma tecnologia que permite a um nó transmitir e receber, ao mesmo tempo, na mesma banda de frequência, ou seja, no mesmo canal. Essa tecnologia tem a potencialidade de dobrar a eficiência espectral [6]. Até recentemente, essa tecnologia era inviável devido, principalmente, a *Self-Interference* (SI), interferência interna do nó causada pelo seu transmissor ao seu receptor [7]. No entanto, avanços recentes de técnicas de cancelamento da SI permitiram diminuí-la à níveis aceitáveis [8][9][10][11][12], tornando esta tecnologia possível para futuras gerações de redes sem fio, como o 5G.

Num sistema de redes sem fio, a transmissão FD pode acontecer de três modos fundamentais: Transmissão Bidirecional (BFD – *Bidirectional Full Duplex),* Transmissão baseada no destino (DBTM – *Destination Based Transmission Mode)* e Transmissão Baseada na origem (SBTM – *Source Based Transmission Mode).* O modo adotado numa transmissão é negociado entre os nós antes do início da transmissão [7]. Nas seções seguintes tem-se uma descrição detalhada de cada um dos modos de transmissão do FD.

1.1.1 - Transmissão FD Bidirecional

Neste modo, as duas comunicações são feitas por apenas dois nós, onde cada um transmite para o outro. Designa-se a primeira comunicação como transmissão primária e a segunda como transmissão secundária. O primeiro nó desempenha o papel de Transmissor Primário (TP) na transmissão primária e de Receptor Secundário (RS) na transmissão secundária. O segundo nó desempenha o papel de Receptor Primário (RP) na transmissão primária, e de Transmissor Secundário (TS) na transmissão secundária [7]. A Figura 1 ilustra a transmissão *Full Duplex* Bidirecional.

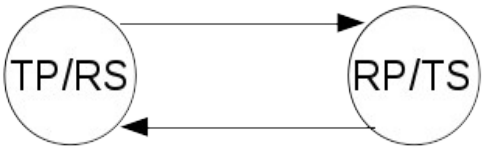

Figura 1.Bidirecional Full Duplex.

1.1.2 - Transmissão FD Baseada no Destino

Neste modo, três nós participam das comunicações. O nó à esquerda desempenha o papel de TP, pois este nó inicia a comunicação primária. O nó central desempenha o papel de RP, pois é o destino da transmissão do nó a esquerda. Depois de estabelecida esta comunicação, o nó central inicia uma outra comunicação com o nó à direita, que além de RP, passa a ser TS; o nó à direita passa a ser o RS. Desta maneira o nó central se comunica com os dois nós laterais e como o nó central é o destino da transmissão primária, então, este modo ganha o nome de Transmissão Baseada no Destino [7]. A Figura 2 ilustra a transmissão *Full Duplex* baseada no destino.

Figura 2.Transmissão Baseada no Destino.

1.1.3 - Transmissão FD Baseada na Origem

Neste modo, três nós participam das comunicações. O nó central desempenha o papel de TP pois este nó inicia a comunicação primária. O nó à esquerda desempenha o papel de RP, pois é o destino da transmissão do nó central. Depois de estabelecida esta comunicação, o nó à direita inicia uma outra comunicação com o nó central, que além de TP, passa a ser RS; o nó à direita passa a ser o TS e como o nó central é a origem da transmissão primária, então, este modo ganha o nome de Transmissão Baseada na Origem [7]. A Figura 3 ilustra a transmissão *Full Duplex* baseada na origem.

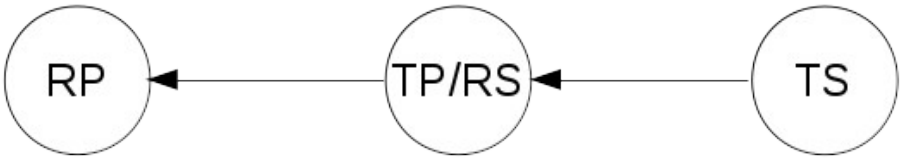

Figura 3.Transmissão Baseada na Origem.

1.2- Desafios para o *Full Duplex*

O bom funcionamento do FD impõe alguns desafios nas camadas físicas (PHY – *Physical*) e de acesso ao meio (MAC – *Medium Acess Control*): interferência ou colisão entre nós, justiça entre os nós *half* e *full duplex*, seleção oportunística dos diferentes modos de FD, sincronização e tempo para estabelecimento de uma transmissão[7].

Para resolver os problemas da camada PHY são necessários novos modelos de nós (rádios) que apresentem não apenas técnicas de cancelamento da SI, mas também novas configurações de antenas. Alguns deles são apresentados em [4][6][13].

Já para a solução dos problemas da camada MAC são necessários novos protocolos de acesso ao meio. Em [7] são apresentados vários deles, classificados de acordo com o modo de transmissão (BFD, DBTM, SBTM) e o tipo de redes de aplicação (rede celular, rede D2D, redes de área local sem fio, redes *multi-hop*, redes de retransmissão).

A tecnologia FD pode ser amplamente usada em diferentes cenários das comunicações sem fio. No entanto, num futuro próximo, se espera que seja implementada em contextos com baixa potência de transmissão e curtas distâncias, como é o caso das *small cells*, comunicação D2D, redes de rádio cognitivo e redes *multi-hop* [7].

1.3- Motivação e Contribuições da Dissertação

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver um modelo matemático que possibilite fazer uma análise de desempenho da tecnologia *full duplex* em redes sem fio. Para tal, utilizou-se como base o artigo "*Node Architecture and MAC Protocol for Full Duplex Wireless and Directional Antennas*", dos autores K. Miura e M. Bandai [13]. No artigo, os autores apresentam uma rede sem fio *multi-hop* em linha com tráfego em apenas um sentido e fazem uma análise da rede baseada unicamente em simulação.

Assim como no artigo citado, em muitos outros artigos, as análises de desempenho das soluções propostas são baseadas apenas em simulação, como em [14], onde os autores apresentam um protocolo MAC distribuído para rádios *full duplex;* em [15], onde os autores apresentam um sistema sem fio multiantenas para tecnologia *full duplex;* em [16] onde é apresentado um protocolo MAC *full duplex* assíncrono para redes multi-hop; em [17] onde é apresentado um protocolo MAC *full duplex* para redes wireless nos diferentes modos de operação FD; e em [18] onde é apresentado um protocolo MAC *full duplex* centralizado, focado na comunicação dispositivo a dispositivo.

Nesse trabalho vamos apresentar um modelo analítico de Cadeias de Markov de Tempo Contínuo (CMTC) multidimensionais, para modelar a rede em questão e analisar algumas métricas de desempenho, como probabilidade de bloqueio e de descarte, capacidade, número médio de elementos no sistema e vazão.

Espera-se que essa pesquisa contribua na análise, desenvolvimento e implementação de sistemas reais que façam uso dessa nova tecnologia, permitindo:

I. A escolha do melhor tipo de nó (com transmissão *half* ou *full duplex*, antenas direcionais ou omnidirecionais) para redes *multi-hop* em linha.

II. Saber o número de posições de *buffer* necessárias para atingir a vazão máxima da rede, ou seja, analisar a influência do *buffer* nos nós.

III. Conhecer o fator ótimo de utilização dos servidores da rede.

As pesquisas efetuadas neste trabalho resultaram na publicação do artigo "***Modeling and Analysis of 5G Full Duplex Wireless Radios***", publicado em *The* S*eventeenth International Conference on Networks* (ICN-2018), Abril 22-26, 2018 – Athena, Grécia.

1.4- Estrutura da Dissertação

O restante do trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 apresenta-se, em detalhes, o modelo de rede em estudo e suas aplicações. No Capítulo 3 apresenta-se a modelagem da rede com Cadeias de Markov de Tempo Continuo (CMTC) e a análise de desempenho e, por último, no Capítulo 4, tem-se as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Redes Sem Fio *Multi-Hop*

Neste capítulo primeiro apresenta-se um conceito abrangente de redes sem fio *multi-hop*, para depois apresentar o cenário da rede em estudo nesta dissertação, que é uma rede sem fio *multi-hop* em linha, na qual analisar-se-á quatro modos de funcionamento.

2.1- Redes *Multi-Hop*

As comunicações sem fio tradicionais são tipicamente suportadas por uma infraestrutura fixa central (estação base ou *access point*), que faz a comunicação entre os nós. Todavia, nas redes *multi-hop* existem um ou mais nós intermediários que recebem e encaminham os pacotes até que estes cheguem ao destino. Essa abordagem traz inúmeros benefícios, tais como: maior cobertura, melhor conectividade, menor consumo de energia, menor potência de transmissão, maiores taxas de dados, maior vazão, uso mais eficiente do espectro e maior robustez da rede [19]. Em [20] as redes *multi-hop* são classificadas, de acordo com a estrutura e aplicação, em:

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

2.2- Cenário da Rede

A rede considerada nessa dissertação é uma rede sem fio *multi-hop* em linha com tráfego apenas em um sentido, composta por 4 nós, sendo eles S, 1, 2 e D, como mostra a Figura 4.

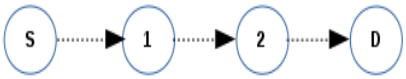

Figura 4: Rede sem fio multi-hop.

Esta rede foi proposta em [13] e opera com base nos seguintes pressupostos:

- Cada nó só pode se comunicar e fazer o sensoriamento dos seus vizinhos. Logo, sua transmissão interfere apenas em seus vizinhos.
- A rede utiliza apenas um único canal que é compartilhado por todas as transmissões.
- O tráfego de dados flui em apenas um sentido, da esquerda para direita.
- Os pacotes entram na rede apenas pelo nó S, sendo assim transmitidos em sequência para o nó 1, nó 2 e finalizando a transmissão para o nó D, que é o destino.
- Não existem colisões na rede, pois todos os nós sabem exatamente quando transmitir e quando ficar em silêncio. Para tal, assume-se que existe um protocolo que controla o compartilhamento do canal.
- Apesar de não existirem colisões, alguns pacotes podem ser descartados na rede, pois o nó que recebe o pacote pode não ter espaço disponível no *buffer*.
- Dependendo do tipo de nós que são utilizados na rede, vários nós poderão receber e transmitir ao mesmo tempo.

2.3- Modos de Operação da Rede

Nas análises realizadas nesta dissertação consideram-se 4 modos de funcionamento da rede. Em cada um dos modos a rede é composta por um tipo diferente de nó e, portanto, opera de maneira diferente. Os nós diferem uns dos outros em termos da tecnologia de transmissão e do número e tipo de antenas utilizadas.

A tecnologia de transmissão adotada pelos nós pode ser *half* ou *full duplex*. Os nós com tecnologia de transmissão *full duplex* podem transmitir e receber ao mesmo tempo. Já os nós *half duplex* podem apenas receber ou transmitir.

Os rádios diferem uns dos outros em termos do tipo e número de antenas. Em [21], os autores propõem o desenho de um rádio com duas antenas omnidirecionais, sendo uma para transmissão e a outra para recepção. Já em [13], os autores propõem o desenho de um rádio com uma antena omnidirecional para recepção (RX) e duas antenas direcionais para transmissão (TX), no qual TX1 transmite de 0 a π e TX2 de

π a 2π. Com isso, o rádio pode operar com TX1-RX ou TX2-RX. Considera-se ainda um terceiro rádio, que é o rádio convencional com apenas uma antena omnidirecional para transmissão e recepção. Os rádios com apenas uma antena não são capazes de realizar a tecnologia de transmissão *full duplex*. As transmissões dos rádios com antenas omnidirecionais afeta a recepção do nó anterior. Por exemplo, a transmissão do nó 2 afeta a recepção do nó 1. Logo, apenas uma dessas operações pode ocorrer em um dado momento, impedindo que o *full duplex* seja utilizado por todos os nós da rede; com antenas direcionais não existe esse problema. Os 4 modos de funcionamento da rede são:

- Modo A[Half,Omni]: a rede é composta por nós com tecnologia de transmissão *half duplex* e rádios com uma única antena omnidirecional para transmissão e recepção. Esta é a configuração convencional.
- Modo B[Full,Omni]: a rede é composta por nós com tecnologia de transmissão *full duplex* e rádios com duas antenas omnidirecionais, sendo uma para transmissão e a outra para recepção, como proposto em [21].
- Modo D[Full,Direc]: a rede é composta por nós com tecnologia de transmissão *full duplex* e rádios com uma antena omnidirecional para recepção e duas antenas direcionais para transmissão, como proposto em [13].
- Modo C[Half,Direc]: a rede é composta por nós com tecnologia de transmissão *half duplex*, mas com rádios com uma antena omnidirecional para recepção e duas antenas direcionais para transmissão, como proposto em [13].

A seguir tem-se uma breve descrição do funcionamento da rede em cada um dos modos de operação.

2.3.1 - Modo A[Half,Omni]

Neste modo a rede é composta por nós do tipo convencional, com tecnologia de transmissão *half duplex* e rádios com uma única antena omnidirecional para transmissão e recepção. Esse modo precisa executar 3 passos para que a

comunicação possa se efetuar do início ao fim da rede, como se pode observar na Figura 5.

i. Neste passo o nó S está transmitindo e o nó 1 não pode transmitir porque os nós são *half duplex*. O nó 2 não pode transmitir porque os nós utilizam antenas omnidirecionais e a sua transmissão afetaria a recepção do nó 1.
ii. Neste passo o nó 1 está transmitindo e não pode receber uma transmissão do nó S, porque os nós são *half duplex*, e o nó 2 também não pode transmitir pelo mesmo motivo.
iii. Neste passo o nó S não pode transmitir porque o nó 1 não conseguiria receber a sua transmissão, por causa da interferência que a transmissão do nó 2 causa no nó 1, devido ao uso de antenas omnidirecionais. O nó 1 não pode transmitir porque o nó 2 não pode receber a sua transmissão, pois os nós são *half duplex*. Aqui começa a transmissão do nó 2 para o nó D e a comunicação se completa.

Portanto, neste modo apenas um nó pode transmitir em um dado momento e o pacote é transmitido do início ao fim da rede sem paradas.

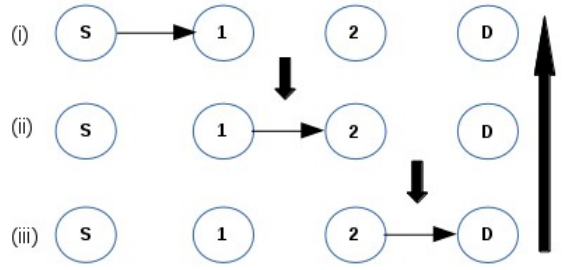

Figura 5: Modo de operação A[Half,Omni].

2.3.2 - Modo B[Full,Omni]

Neste modo a rede é composta por nós com tecnologia de transmissão *full duplex* e rádios com duas antenas omnidirecionais, uma para transmissão e outra para recepção. Esse modo precisa executar 2 passos para que a comunicação possa se efetuar do início ao fim da rede, como pode-se observar na Figura 6.

i. Neste passo ocorre a transmissão do nó S para o nó 1 e do nó 1 para o nó 2. O nó 2 não pode transmitir porque os nós utilizam antenas omnidirecionais e a sua transmissão afetaria a recepção do nó 1.

ii. Neste passo o nó S não pode transmitir porque o nó 1 não conseguiria receber a sua transmissão devido à interferência que a transmissão do nó 2 causa no nó 1, por causa do uso de antenas omnidirecionais. No entanto, o nó 1 pode transmitir para o nó 2. Aqui começa a transmissão do nó 2 para o nó D e a comunicação se completa.

Portanto, neste modo dois nós podem transmitir simultaneamente, a saber os nós S e 1, ou os nós 1 e 2.

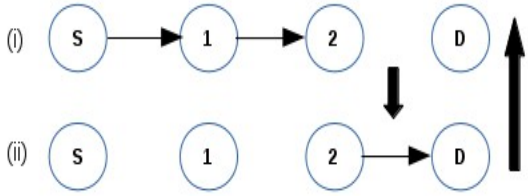

Figura 6: Modo de operação B[Full,Omni].

2.3.3 - Modo D[Full,Direc]

Neste modo a rede é composta por nós com tecnologia de transmissão *full duplex* e rádios com uma antena omnidirecional para recepção e duas antenas direcionais para transmissão, apesar da transmissão de dados ocorrer apenas em um sentido a outra antena de transmissão pode ser utilizada para transmitir informações de controle, todavia esse tráfego não é considerado na modelagem. Esse modo precisa executar apenas 1 passo para que a comunicação possa se efetuar por completo na rede, como se pode observar na Figura 7:

i. Neste passo o nó 1 pode receber a transmissão do nó S sem interferência da transmissão do nó 2, porque os nós usam antenas direcionais, e pode transmitir para o nó 2, pois os nós utilizam a transmissão *full duplex*. Pelo mesmo motivo, o nó 2 pode receber do nó 1 e transmitir ao nó D ao mesmo tempo.

Portanto, neste modo todos os nós podem transmitir simultaneamente.

Figura 7: Modo de operação D[Full,Omni].

2.3.4 - Modo C[Half,Direc]

Neste modo a rede é composta por nós com tecnologia de transmissão *half duplex*, porém com rádios com uma antena omnidirecional para recepção e duas antenas direcionais para transmissão. Esse modo precisa executar 2 passos para que a comunicação se efetue do início ao fim da rede, como se pode observar na Figura 8:

i. Neste passo o nó 1, estando a receber uma transmissão do nó S, não pode transmitir para o nó 2, porque os nós utilizam a transmissão *half duplex,* mas o nó 2 pode transmitir para o destino, pois a sua transmissão não afeta a recepção do nó 1, devido ao uso de antenas direcionais.

ii. Neste passo o nó S não pode transmitir porque o nó 1 não pode receber a sua transmissão, pois os nós utilizam transmissão *half duplex,* e o nó 1 já está envolvido em uma transmissão; o nó 2 não pode transmitir por causa do mesmo motivo.

Portanto, neste modo dois nós podem transmitir simultaneamente, a saber os nós S e 2.

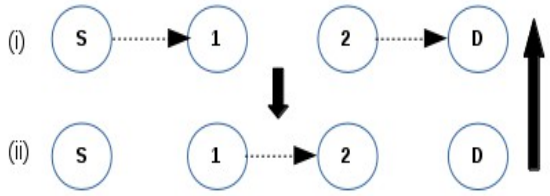

Figura 8: Modo de operação C[Half,Direc].

Capítulo 3 - Modelo Markoviano para Análise de Desempenho

Neste capítulo modela-se cada um dos modos de operação da rede descritos no capítulo anterior, utilizando cadeias de Markov.

Primeiramente apresentam-se algumas considerações genéricas para todos os modos de operação. Em seguida, faz-se o modelamento específico de cada um dos modos de operação, acompanhado do cálculo da matriz de transição e das probabilidades em regime estacionário. Por fim, são definidas as métricas de análise de desempenho e analisa-se o desempenho de cada modo.

Na modelagem específico de cada um dos modos de operação mostra-se o conjunto de estados possíveis, o diagrama de estados, os eventos que geram as transições e as equações utilizadas para modelar as mesmas.

3.1- Análise da Cadeia de Markov de Tempo Contínuo

Para o modelamento dos modos de operação utiliza-se cadeias de Markov de tempo contínuo multidimensionais, nas quais as transições ocorrem devido à chegada e partida de pacotes na rede e da transmissão de pacotes de um nó para outro. O processo de chegada segue a distribuição de *Poisson* com valor médio de chegada igual a λ pacotes/segundos. O tempo de serviço segue a distribuição exponencial com valor médio igual a $1/\mu$ segundos, onde μ é a taxa de partida máxima ou taxa de serviço em pacotes/segundos.

Considera-se a seguinte representação de um estado nas cadeias analisadas:

$x=\{i(wi),j(wj),k(wk)\}$, em que: (1)

- *i* representa a existência ou não 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 ou não de uma transmissão do nó 1 para o nó *2*.
- *wj* representa o número de pacotes em espera no nó 1.
- *k* representa a existência ou não de uma transmissão do nó 2 para o nó D.
- *wk* representa o número de pacotes em espera no nó 2.

As dimensões *i,j,k* assumem valor 1, caso esteja em curso uma transmissão, e 0, caso contrário, logo $0 \leq i,j,k \leq 1$. Pode-se ter no máximo 3 transmissões em curso a um dado momento, ou seja, $i+j+k \leq 3$. As dimensões *wi,wj,wk* assumem valores que vão de 0 até o tamanho do *buffer,* logo, $0 \leq wi,wj,wk \leq buffer$. Para simplificar, denomina-se *i(wi)* como servidor *i*; *j(wj)* como servidor *j*; e *k(wk)* como servidor *k*. Todas as dimensões assumem apenas valores inteiros.

A resolução de uma Cadeia de Markov onde os estados têm seis dimensões é um processo muito difícil e trabalhoso. Assim, decidiu-se considerar, em um primeiro estágio, a título de simplificação, um modelo onde apenas 1 pacote pode estar em um servidor, em transmissão ou em espera. Essas restrições criam um cenário onde não existe *buffer*, pois apenas um pacote pode estar em um servidor a um dado momento. Apesar de ser um modelo transitório, pode-se realizar nele toda a análise de desempenho que será feita no modelo com *buffer,* onde pode haver mais de um pacote em um dado servidor. A seguir tem-se uma descrição detalhada desse primeiro modelo.

3.2- Modelo Sem *Buffer*

Neste cenário o número total de pacotes em um servidor não pode ser maior que 1, logo, $i+wi \leq 1$; $j+wj \leq 1$; $k+wk \leq 1$ e $0 \leq i,wi,j,wj,k,wk \leq 1$. O pacote pode estar em transmissão, por exemplo, $i=1$ e $wi=0$, ou em espera, por exemplo, $i=0$ e $wi=1$. A soma das dimensões $wi+wj+wk$ não pode ser igual a 3, porque isso significaria que os três servidores têm pacote em espera e nenhum está a transmitir, logo, $wi+wj+wk \leq 2$.

3.2.1 - Modo A[Half,Omni]

Neste modo apenas um servidor pode transmitir a um dado momento. Logo, $i+j+k \leq 1$. O pacote é transmitido do primeiro servidor até ao destino antes de outro pacote começar a ser transmitido, o que significa que não existem paradas no meio da rede. Logo *wj e wk* serão sempre iguais à *0.* O conjunto de estados fica definido como:

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

3.2.1.1 - Diagrama de Transição de Estados

A seguir tem-se a descrição de todas as transições ilustradas na Figura 9, que representa a cadeia de Markov para este modo, onde constam todos os possíveis estados, transições e suas respectivas taxas. Todas as transições são numeradas e modeladas 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; e a coluna "*condição*" representa o conjunto de condições necessárias para que a transição possa ocorrer.

O estado inicial do sistema é o estado 0(0),0(0),0(0) em que 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 pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, 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), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),0(0),1(0), onde este pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó 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 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), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado inicial 0(0),0(0),0(0), em que 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 0(1),1(0),0(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(1),0(0),1(0), onde este pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino.

8 – No estado 0(1),0(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 1(0),0(0),0(0), onde o pacote em espera no nó S começa a ser transmitido para o nó 1.

Nos estados 1(0),0(0),0(0), 0(1),1(0),0(0) e 0(1),0(0),1(0), haverá o bloqueio de um novo pacote que chegar no nó S, pois, apenas um pacote pode estar em um servidor.

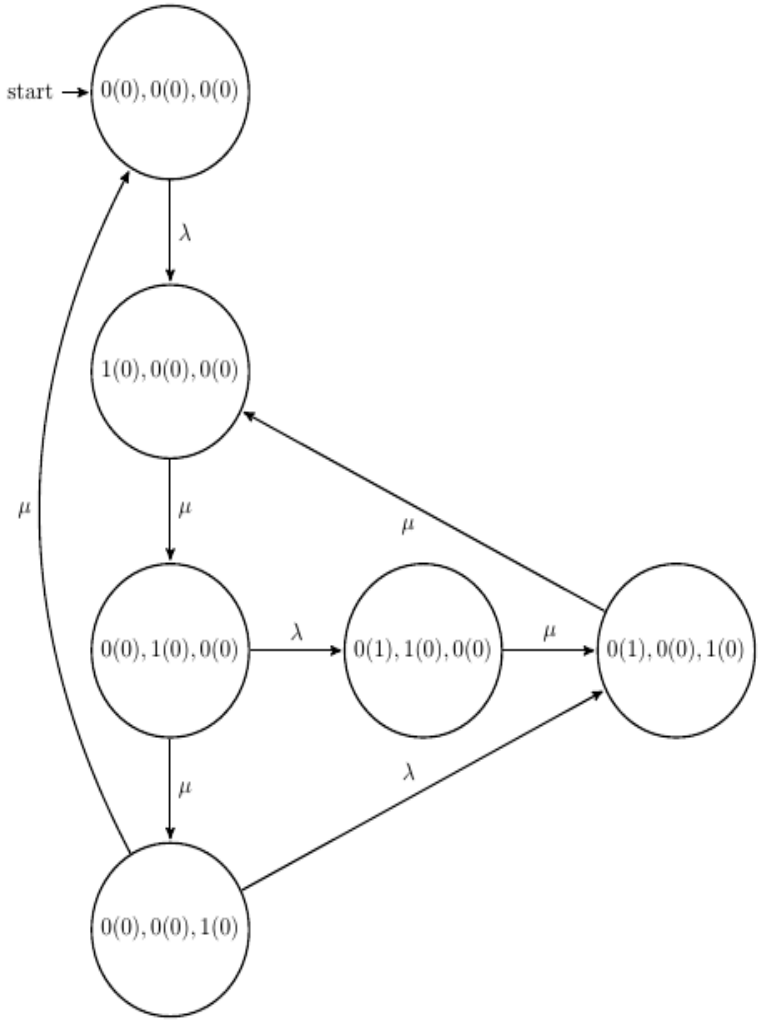

Figura 9: Modo A[Half,Omni] Diagrama de transição de estados sem buffer.

Tabela 1: Modo A[Half,Omni] equações de transição 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	i=1; wi=0; j=0; wj=0; k=0; wk=0
3	i, wi, j-1, wj, k+1, wk	μ	i=0; wi=0; j=1; wj=0; k=0; wk=0
4	i, wi+1, 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	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, wi, j-1, wj, k+1, wk	μ	i=0; wi=1; j=1; wj=0; k=0; wk=0
8	i+1, wi-1, j, wj, k-1, wk	μ	i=0; wi=1; j=0; wj=0; k=1; wk=0

3.2.2 - Modo B[Full,Omni]

Neste modo pode-se ter no máximo 2 servidores transmitindo ao mesmo tempo, logo, $i+j+k \leq 2$. Os servidores i e k não podem transmitir ao mesmo tempo, logo, $i+k \leq 1$. *Já o* servidor 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, a sua posição de espera wj será sempre 0. O conjunto de estados fica definido como:

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

3.2.2.1 - Diagrama de Transição de Estados

A seguir tem-se a descrição de todas as transições ilustradas na Figura 10, que representa a cadeia de Markov para este modo, onde constam todos os possíveis estados, transições e suas respectivas taxas. Todas as transições são numeradas e modeladas 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; e a coluna "*condição*" representa o conjunto de condições necessárias para que a transição possa ocorrer.

O estado inicial do sistema é o estado 0(0),0(0),0(0), em que 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 pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),1(0),0(0), onde este pacote começa a ser transmitido do no 1 para o nó 2.

3 – No estado 0(0),1(0),0(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),0(0),1(0), onde este pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó 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.

5 – No estado 0(0),0(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva 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), a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),1(0),0(0), onde o pacote é descartado no nó 1, pois já existe um pacote no nó 1.

8 – No estado 1(0),1(0),0(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 1(0),0(0),0(1), onde este pacote é colocado em espera no nó 2.

9 – No estado 0(1),0(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 1(0),0(0),0(0), onde o pacote em espera no nó S começa a ser transmitido para o nó 1.

10 – No estado 1(0),0(0),0(1), a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, 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 o pacote em espera no nó 2 começa a ser transmitido para o nó destino.

11 – No estado 0(0),1(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva 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.

12 – No estado 0(0),1(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, 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 S.

14 – No estado 0(1),1(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, 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), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, 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*) haverá o bloqueio de um novo pacote que chegar no nó S, pois, apenas um pacote pode estar em um servidor.

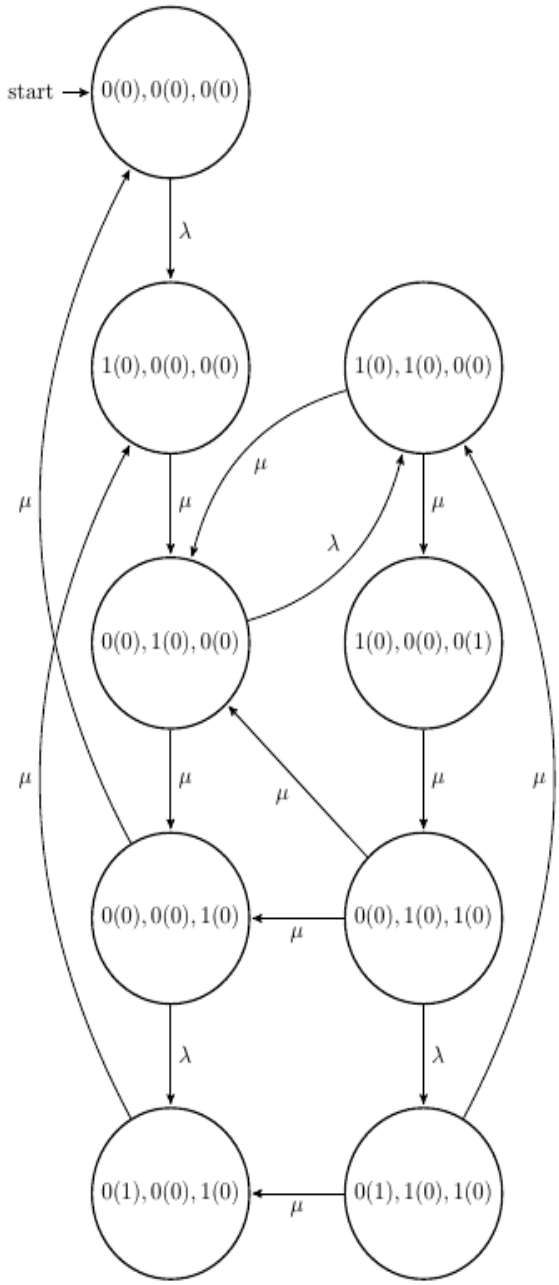

Figura 10: Modo B[Full,Omni] diagrama de transição de estados sem buffer.

Tabela 2: Modo B[Full,Omni] equações de transição 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	i=1; wi=0; j=0; wj=0; k=0; wk=0
3	i, wi, j-1, wj, k+1, wk	μ	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	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	i=1; wi=0; j=1; wj=0; k=0; wk=0
8	i, wi, j-1, wj, k, wk+1	μ	i=1; wi=0; j=1; wj=0; k=0; wk=0
9	i+1, wi-1, j, wj, k-1, wk	μ	i=0; wi=1; j=0; wj=0; k=1; wk=0
10	i-1, wi, j+1, wj, k+1, wk-1	μ	i=1; wi=0; j=0; wj=0; k=0; wk=1
11	i, wi, j-1, wj, k, wk	μ	i=0; wi=0; j=1; wj=0; k=1; wk=0
12	i, wi, j, wj, k-1, wk	μ	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	i=0; wi=1; j=1; wj=0; k=1; wk=0
15	i+1, wi-1, j, wj, k-1, wk	μ	i=0; wi=1; j=1; wj=0; k=1; wk=0

3.2.3 - Modo C[Half,Direc]

Neste modo pode-se ter no máximo 2 servidores transmitindo ao mesmo tempo, logo, $i+j+k \leq 2$. O servidor j não pode transmitir simultaneamente com o servidor i ou k, logo, $i+j \leq 1$; $j+k \leq 1$. Sempre que o servidor j termina de transmitir, o servidor k inicia sua transmissão. Assim, o servidor k não coloca pacotes em espera e wk será sempre 0. O conjunto de estados fica definido como:

$$S=\{x \mid 0 \leq i,wi,j,wj,k \leq 1\,;i+j+k \leq 2\,;i+j \leq 1\,;j+k \leq 1\,;i+wi \leq 1\,;j+wj \leq 1\,;wk=0\,;\} \qquad (4)$$

3.2.3.1 - Diagrama de Transição de Estados

A seguir tem-se a descrição de todas as transições ilustradas na Figura 11, que representa a cadeia de Markov para este modo, onde constam todos os possíveis estados, transições e suas respectivas taxas. Todas as transições são numeradas e modeladas 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 para que a transição possa ocorrer.

O estado inicial do sistema é o estado 0(0),0(0),0(0) em que 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 pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, 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), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),0(0),1(0), onde este pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó 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 0(1),1(0),0(0), onde este pacote é colocado em espera no S.

5 – No estado 0(0),0(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva 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 no S para o nó 1.

7 – No estado 0(1),1(0),0(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, 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, 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), a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),0(1),1(0), onde este pacote é colocado em espera no nó 1.

9 – No estado 1(0),0(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 1(0),0(0),0(0).

10 – No estado (0),0(1),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva 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(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), a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),0(1),1(0), onde o pacote é descartado no nó 1, pois já existe um pacote no nó 1.

13 – No estado 1(0),0(1),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 1(0),0(1),0(0).

14 – No estado 1(0),0(1),0(0), a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),1(0),0(0), onde o pacote é descartado no nó 1, pois já existe um pacote no nó 1, que começa a ser transmitido para o nó 2.

Nos estados 1(0),0(*wj*),*k*(0) e 0(1),1(*wj*),0(0) haverá o bloqueio de um novo pacote que chegar no nó S, pois apenas um pacote pode estar em um servidor.

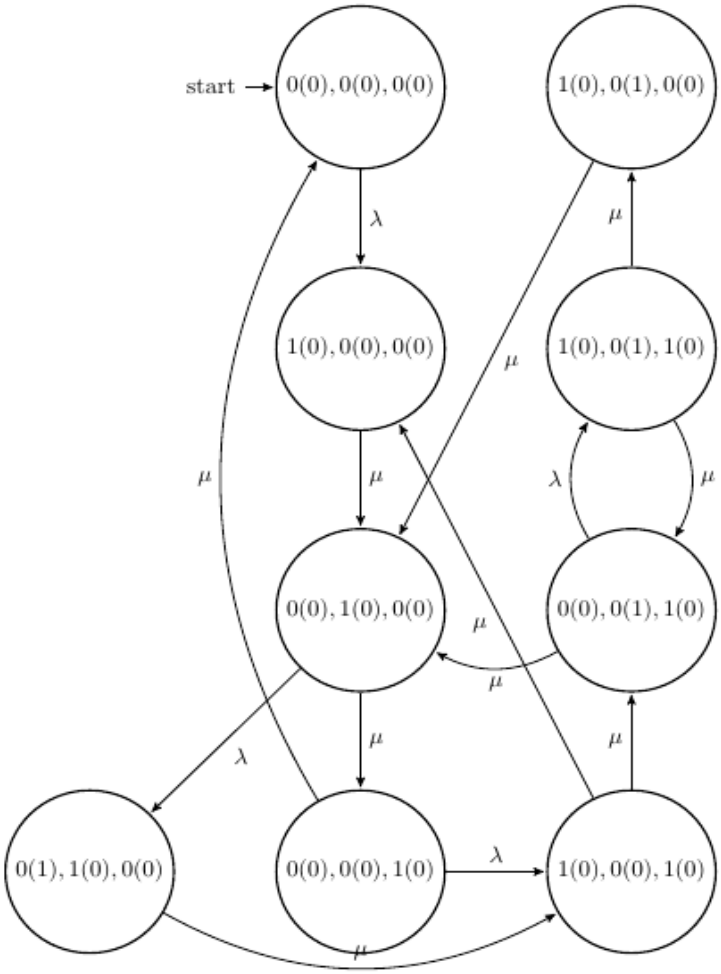

Figura 11: Modo C[Half,Direc] diagrama de transição de estados sem buffer.

Tabela 3: Modo C[Full,Direc] equações de transição 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	*i*=1; *wi*=0; *j*=0; *wj*=0; *k*=0; *wk*=0
3	*i*, *wi*, *j*-1, *wj*, *k*+1, *wk*	μ	*i*=0; *wi*=0; *j*=1; *wj*=0; *k*=0; *wk*=0
4	*i*, *wi*+1, *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	*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*+1, *wi*-1, *j*-1, *wj*, *k*+1, *wk*	μ	*i*=0; *wi*=1; *j*=1; *wj*=0; *k*=0; *wk*=0
8	*i*-1, *wi*, *j*, *wj*+1, *k*, *wk*	μ	*i*=1; *wi*=0; *j*=0; *wj*=0; *k*=1; *wk*=0

9	i, wi, j, wj, k-1, wk	μ	i=1; wi=0; j=0; wj=0; k=1; wk=0
10	i, wi, j+1, wj-1, k-1, wk	μ	i=0; wi=0; j=0; wj=1; k=1; wk=0
11	i+1, wi, j, wj, k, wk	μ	i=0; wi=0; j=0; wj=1; k=1; wk=0
12	i-1, wi, j, wj, k, wk	μ	i=1; wi=0; j=0; wj=1; k=1; wk=0
13	i, wi, j, wj, k-1, wk	μ	i=1; wi=0; j=0; wj=1; k=1; wk=0
14	i-1, wi, j+1, wj-1, k, wk	μ	i=1; wi=0; j=0; wj=1; k=0; wk=0

3.2.4 - Modo D[Full,Direc]

Neste modo todos os servidores podem transmitir ao mesmo momento, logo, $i+j+k \leq 3$, e, por isso, as posições de espera serão sempre 0, wi=0, wj=0 e wk=0. O conjunto de estados fica definido como:

$$S=\{x|0 \leq i,j,k \leq 1\,;i+j+k \leq 3\,;wi=0\,;wj=0;wk=0\} \quad (5)$$

3.2.4.1 - Diagrama de Transição de Estados

A seguir tem-se a descrição de todas as transições ilustradas na Figura 12, que representa a cadeia de Markov para este modo, onde constam todos os possíveis estados, transições e suas respectivas taxas. Todas as transições são numeradas e modeladas na Tabela 4, 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 a transição possa ocorrer.

O estado inicial do sistema é o estado 0(0),0(0),0(0) em que 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 pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, 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), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),0(0),1(0), onde este pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó 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.

5 – No estado 0(0),0(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva 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 no S para o nó 1.

7 – No estado 1(0),1(0),0(0), a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),1(0),0(0), onde o pacote é descartado no nó 1, pois já existe um pacote no nó 1.

8 – No estado 1(0),1(0),0(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, 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.

9 – No estado 1(0),0(0),1(0), a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, 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.

10 – No estado 1(0),0(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 1(0),0(0),0(0).

11 – No estado 0(0),1(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva 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.

12 – No estado 0(0),1(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, 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 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), a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),1(0),1(0), onde o pacote é descartado no nó 1, pois já existe um pacote no nó 1.

15 – No estado 1(0),1(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 1(0),0(0),1(0), onde o pacote é descartado no nó 2, pois já existe um pacote no nó 2.

16 – No estado 1(0),1(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 1(0),1(0),0(0).

Nos estados 1(0),*j*(0),*k*(0) haverá o bloqueio de um novo pacote que chegar no nó S, pois, apenas um pacote pode estar em um servidor.

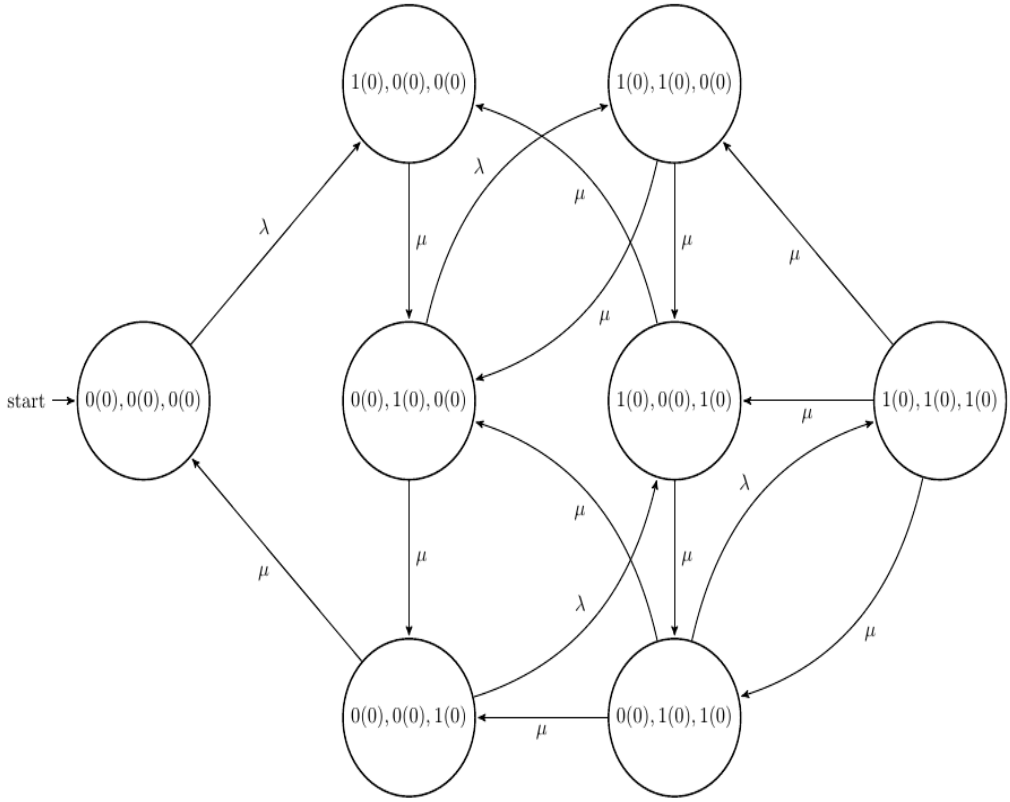

Figura 12: Modo D[Full,Direc] diagrama de transição de estados sem buffer.

Tabela 4: Modo D[Full,Direc] equações de transição 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	*i*=1; *wi*=0; *j*=0; *wj*=0; *k*=0; *wk*=0
3	*i*, *wi*, *j*-1, *wj*, *k*+1, *wk*	μ	*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	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-1, wi, j, wj, k, wk	μ	i=1; wi=0; j=1; wj=0; k=0; wk=0
8	i, wi, j-1, wj, k+1, wk	μ	i=1; wi=0; j=1; wj=0; k=0; wk=0
9	i-1, wi, j+1, wj, k, wk	μ	i=1; wi=0; j=0; wj=0; k=1; wk=0
10	i, wi, j, wj, k-1, wk	μ	i=1; wi=0; j=0; wj=0; k=1; wk=0
11	i, wi, j-1, wj, k, wk	μ	i=0; wi=0; j=1; wj=0; k=1; wk=0
12	i, wi, j, wj, k-1, wk	μ	i=0; wi=0; j=1; wj=0; k=1; wk=0
13	i+1, wi, j, wj, k, wk	λ	i=0; wi=0; j=1; wj=0; k=1; wk=0
14	i-1, wi, j, wj, k, wk	μ	i=1; wi=0; j=1; wj=0; k=1; wk=0
15	i, wi, j-1, wj, k, wk	μ	i=1; wi=0; j=1; wj=0; k=1; wk=0
16	i, wi, j, wj, k-1, wk	μ	i=1; wi=0; j=1; wj=0; k=1; wk=0

3.3- Matriz de Transição e Probabilidades em Regime Estacionário

As probabilidades em regime estacionário π(x) são calculadas através da matriz de transição e da equação de normalização, dadas pela equação (6).

$$\pi Q = 0, \quad \sum_{x \in S} \pi(x) = 1 . \tag{6}$$

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 de transição Q, precisa-se calcular para cada estado a soma total das suas taxas de transições. Uma vez encontradas, as somas q_{xy} para todo $x,y(x \neq y) \epsilon S$, os elementos da diagonal principal da matriz, q_{xx}, $x \epsilon S$, são encontrados por meio da Equação (7):

$$q_{xx} = -\sum_{y \in S, y \neq x} q_{xy} \tag{7}$$

Para efetuar os cálculos utilizou-se o MatLab que é uma ferramenta computacional para cálculos matemáticos. O procedimento do cálculo das probabilidades em regime estacionário foi implementado em 3 passos:

1. Por meio das equações de transição gera-se o conjunto de estados S e a matriz de transição Q. Começando no estado inicial testa-se todas as condições dos eventos de transição, se o estado cumprir as condições, então, realiza-se a transição nesse estado, adiciona-se essa transição à matriz de transições e insere-se o estado resultante na matriz de estados caso se trate de um novo estado. Este procedimento é detalhado no anexo A.
2. Os elementos da diagonal principal de Q são encontrados a partir da Equação (7).
3. As probabilidades em regime estacionário são geradas a partir da Equação (6).

Para ilustrar o método, segue-se, a título de exemplo, o cálculo das probabilidades em regime estacionário do modo A[Half,Omni], considerando taxa de chegada λ=1 pac/s e taxa de serviço μ=2 pac/s.

Inicialmente determina-se o conjunto de estados possíveis, que é representado pela matriz S, onde cada linha representa um dos estados possíveis e as colunas

representam, respectivamente, *i,(wi),j,(wj),k(wk)*. O número 1 em cada linha representa o nó que está em transmissão no estado correspondente ou o nó que tem pacote em espera.

$$S=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

A partir da matriz de estados *S* determina-se agora a matriz de transição de estados Q^x, apresentada a seguir, em que cada termo $Q^x_{n\ m}$ representa a taxa de transição do estado *n* para o estado *m*.

Por exemplo, na matriz Q^x apresentada, o termo $Q^x_{0\ 1}$ representa que há uma transição do estado 0 para o estado 1 com taxa λ=1 pacote/seg, que corresponde à chegada de um pacote no nó S.

$$Q^x=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Definidas todas as possíveis transições de estados, determina-se então a diagonal principal da matriz Q^x, por meio da Equação (7), resultando então na matriz de transição de estados Q, apresentada a seguir.

$$Q=\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & -3 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix}$$

com a matriz Q resolve-se o sistema de equações formado pelas equações (8) e (9), por meio da operação $\Pi(x)=Q^T\backslash B$ no Matlab, onde:

Π(x) é a matriz das probabilidades em regime estacionário.

Q^T, é a matriz transposta da matriz de transição Q, que é igual aos coeficientes da multiplicação resultante da equação (8), a qual adiciona-se uma linha de uns no final que representa os coeficientes da equação (9).

B, é uma matriz coluna, com o mesmo número de linhas que a matriz Q^T, em que as linhas de 1 a 6 têm valor 0 e a sétima tem valor 1, esses valores representam as constantes do sistema de equação.

$$[\Pi_0\ \Pi_1\ \Pi_2\ \Pi_3\ \Pi_4\ \Pi_5]\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & -3 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix} = 0 \tag{8}$$

$$\Pi_0 + \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 + \Pi_5 = 1 \tag{9}$$

$$Q^T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & -3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Resultando em:

$$\Pi(x) = \begin{bmatrix} 0.228571 \\ 0.257143 \\ 0.171429 \\ 0.085714 \\ 0.114286 \\ 0.142857 \end{bmatrix}$$

Uma vez calculadas as probabilidades em regime estacionário, estamos em condições de analisar o sistema de acordo as métricas de desempenho.

3.4- Métricas de Desempenho para o Modelo sem *Buffer*

Nesta sessão são apresentadas as métricas de desempenho dos modos de operação, o desempenho de cada modo de operação, bem como a comparação entre eles. Os parâmetros utilizados nas análises são: taxa de chegada de pacotes, λ, variando de 1 a 10 pac/s, taxa de serviço, μ, igual a 10 pac/s. A análise de desempenho é feita em função do tráfego normalizado ou fator de utilização, $\rho=\lambda/\mu$, que em todos os gráficos corresponde ao eixo x.

A) Probabilidade de Bloqueio

A probabilidade de bloqueio, *P,* representa o somatório das probabilidades dos estados onde o primeiro servidor não tem espaço para receber um novo pacote, e é calculada por meio de Equação (10):

$$P=\sum_{x\in S}\pi(x),\quad Se\ \ (i+wi)=1 \tag{10}$$

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

A Figura 13 apresenta as probabilidades de bloqueio dos diferentes modos de operação da rede. O modo A[Half,Omni] tem a maior probabilidade de bloqueio. Isso se deve ao fato de que, nesse modo, enquanto um pacote não é transmitido até ao final da rede, nenhum outro pacote pode ser transmitido. O modo D[Full,Direc] tem a menor probabilidade de bloqueio, porque é o modo com mais disponibilidade de transmissão. Já os modos B[Full,Omni] e C[Half,Direc] têm uma probabilidade de bloqueio similar, com uma ligeira superioridade do modo C[Half,Direc].

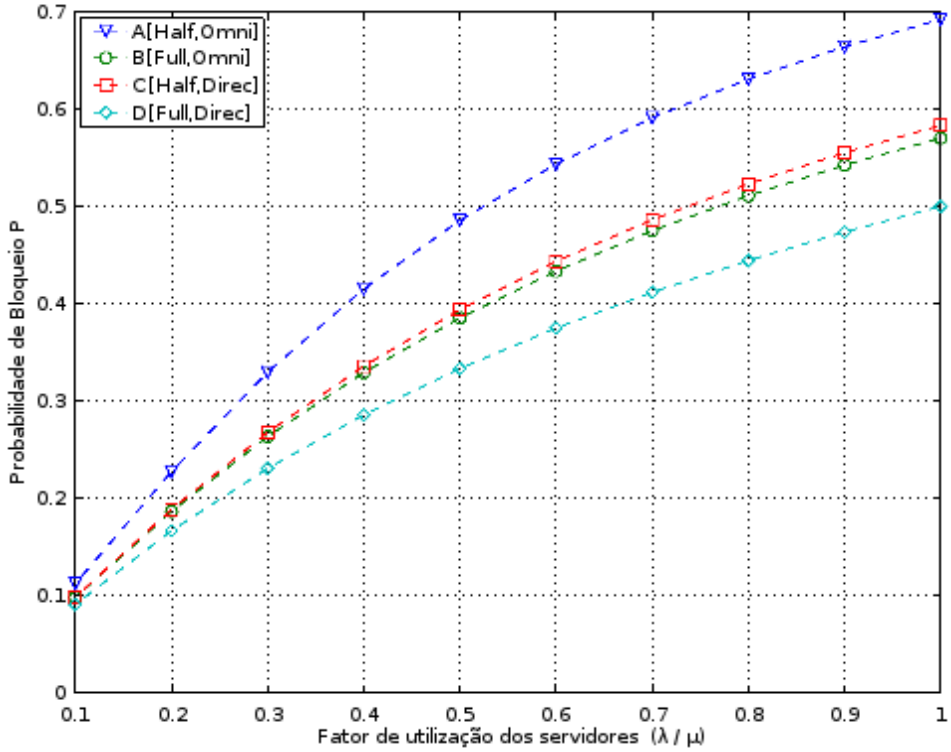

Figura 13: Probabilidade de bloqueio.

B) Capacidade

A capacidade do sistema, *C*, representa a taxa média de transmissões efetuadas com sucesso por unidade de tempo, em que uma transmissão com sucesso ocorre quando o pacote é transmitido pelo último servidor *k* para o nó destino, e é calculada por meio da Equação (11):

$$C = \sum_{x \in S} \pi(x)\mu, \quad Se \quad k=1 \tag{11}$$

Onde π(x) representa a probabilidade do estado *x* da cadeia, *k*=1 significa que nesse estado o servidor *k* está transmitindo um pacote e μ é a taxa de transmissão.

A capacidade é apresentada em percentagem da taxa de serviço μ=10 pacotes/s.

A Figura 14 mostra que o modo C[Half,Direc] tem a maior capacidade entre os modos de transmissão, seguido dos modos D[Full,Direc] e A[Half,Omni], que têm uma capacidade muito similar, e, por fim, temos o modo B[Full,Omni] com a menor capacidade.

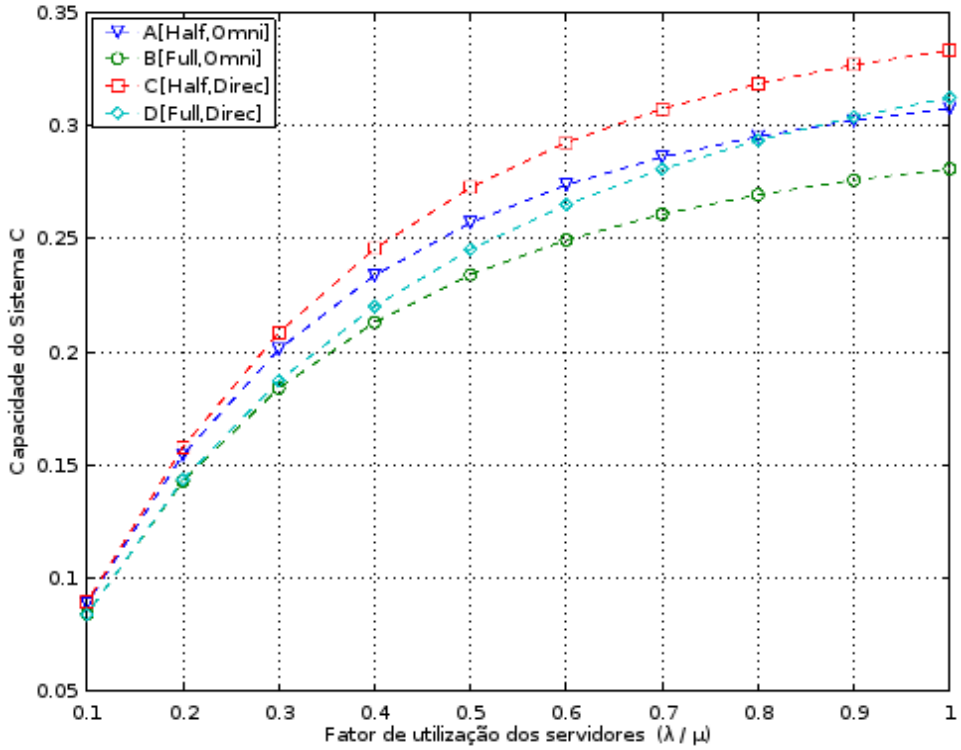

Figura 14: Capacidade do sistema / μ.

C) Probabilidade de Descarte

A probabilidade de descarte, *D*, representa a probabilidade de um pacote que entrou na rede ser descartado antes de chegar ao destino, e é calculada por meio da Equação (12):

$$D = 1 - Ps \tag{12}$$

Onde *Ps* representa a probabilidade que um pacote que entrou na rede seja transmitido com sucesso até o destino, calculada pela razão entre a taxa média de pacotes que são transmitidos com sucesso, representada por *C*, e a taxa média de pacotes que entra na rede, dada pela Equação (13):

$$Ps = \frac{C}{\lambda(1-P)} \tag{13}$$

A Figura 15 representa as probabilidades de descarte dos diferentes modos de operação. Pode-se perceber que o modo A[Half,Omni] não tem descarte porque os seus pacotes são transmitidos pela rede até o final, sem interrupções. Já os modos

B[Full,Omni] e D[Full,Direc] têm as maiores probabilidades de descarte devido ao uso da tecnologia *full duplex,* que permite o envio e recepção simultânea. No entanto, como não existe *buffer*, quando um pacote é recebido num servidor enquanto o mesmo está a transmitir, o pacote recebido é descartado.

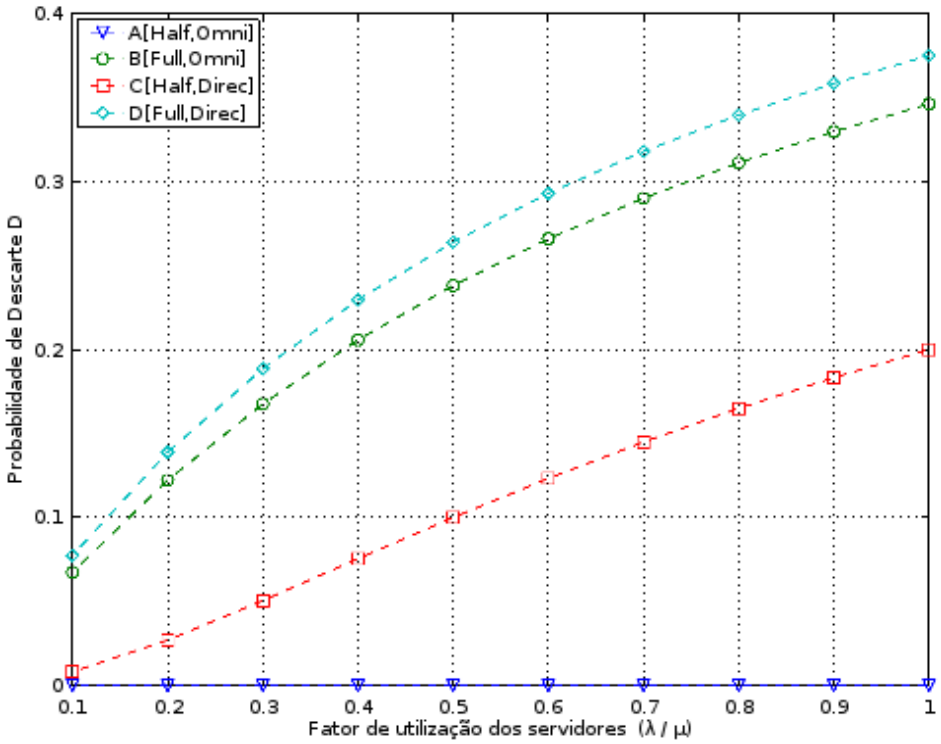

Figura 15: Probabilidade de descarte.

D) Vazão

A vazão, *Th*, representa a relação entre a taxa média de transmissões efetuadas com sucesso, *C*, e a taxa total de chegadas ao sistema λ, e é calculada por meio da Equação (14):

$$Th = \frac{C}{\lambda} \tag{14}$$

Pode-se observar na Figura 16, que o modo de transmissão C[Half,Direc] apresenta uma vazão superior aos demais, isso se deve ao fato de sua capacidade ser superior. Logo após estão os modos A[Half,Omni] e D[Full,Direc], que tem uma vazão parecida, com uma ligeira vantagem do modo D[Full,Direc], quando o fator de

utilização dos servidores passa os 90%, assim como acontece na capacidade, e, por fim, temos o modo B[Full,Omni] com a menor vazão.

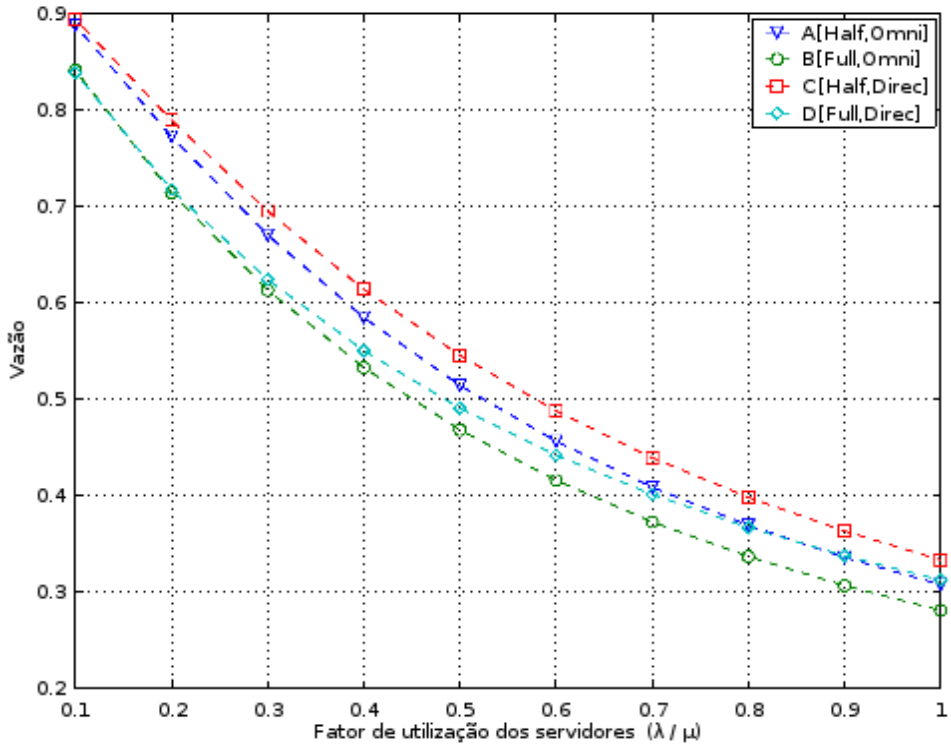

Figura 16: Vazão.

E) Número Médio de Elementos no Sistema

O número médio de elementos no sistema, *Eq*, é calculado por meio da Equação (15):

$$E_q = \sum_{x \in S} \pi(x) N(x) \tag{15}$$

Onde π(x) representa a probabilidade do estado *x* da cadeia e N(x) o somatório de todos os pacotes neste estado, ou seja, N(x)=*i*+*wi*+*j*+*wj*+*k*+*wk*.

Na Figura 17, pode-se observar que os modos B[Full,Omni] e D[Full,Direc] têm o menor número médio de pacotes no sistema, isso se deve à tecnologia de transmissão *full duplex*, que permite o envio e recebimento simultâneo. Já os modos A[Half,Omni] e C[Half,Direc] têm o maior número médio de elementos no sistema.

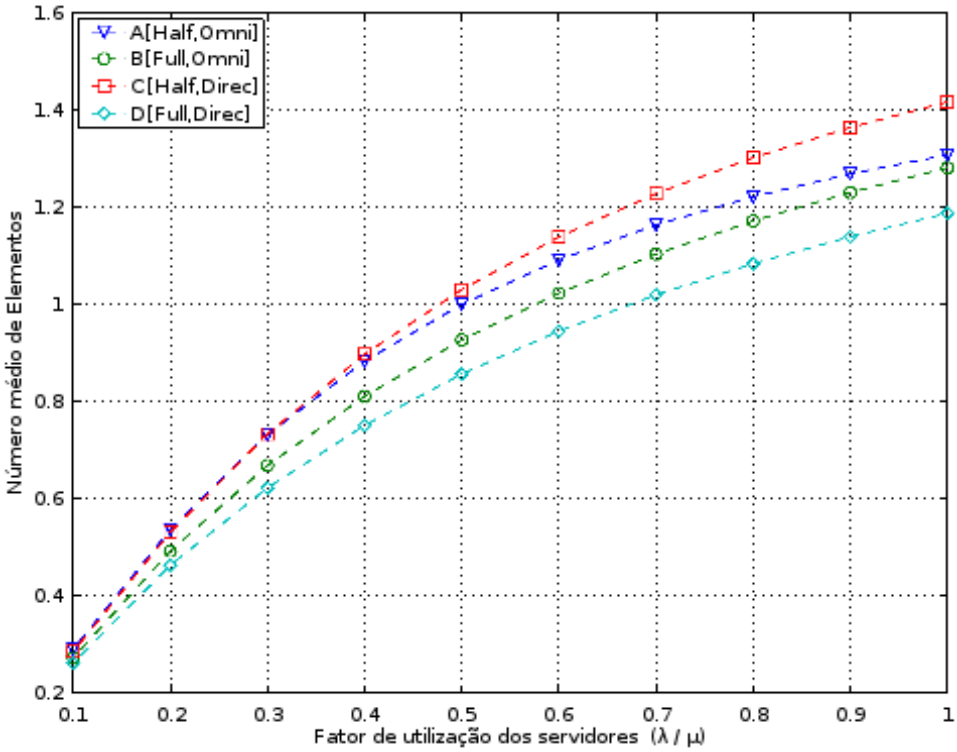

Figura 17: Número médio de elementos no sistema.

3.5- Conclusões do Modelo sem *Buffer*

Com base nas análises apresentadas, pode-se concluir, para o modelo sem *buffer,* que:

- ✓ Os modos de operação que utilizam a tecnologia *full duplex* têm uma probabilidade de bloqueio inferior aos modos *half duplex*. Isso significa que a tecnologia *full duplex* permite que um número maior de pacotes entre na rede.
- ✓ Em contrapartida, os modos que utilizam a tecnologia *full duplex* apresentam uma probabilidade de descarte superior aos modos *half duplex*, e isso afeta o desempenho desses modos, como se pode observar na capacidade e na vazão.
- ✓ Por último, temos que os modos que utilizam a tecnologia *full duplex* têm, em média, menos pacotes no sistema, pois podem enviar e receber ao mesmo tempo.

De modo geral, pode-se concluir que a tecnologia *full duplex*, tendo uma probabilidade de bloqueio inferior à tecnologia *half duplex*, tem o potencial de ter

uma capacidade e vazão superior. No entanto, devido à inexistência de *buffer*, existe uma grande probabilidade de descarte, que afeta bastante o seu desempenho. Ou seja, para se obter os benefícios esperados da tecnologia *full duplex* é preciso haver *buffer* suficiente nos nós da rede. A análise do sistema com *buffer* é tratada na Seção 3.6, a seguir.

3.6- Modelo com *Buffer*

Neste modelo os modos de operação continuam a funcionar de acordo com as mesmas regras que no modelo sem *buffer* (b), a única diferença é que neste modelo vários pacotes, limitado ao tamanho do *buffer,* podem estar num dado servidor ao mesmo tempo, ou seja, $0 \leq wi, wj, wk \leq b$. Com isso, o número total de pacotes nos servidores passa a ser $i+wi \leq b+1$; $j+wj \leq b+1$ e $k+wk \leq b+1$.

Devido à existência de *buffer* pode ocorrer de um servidor ter muitos pacotes para transmitir. Para evitar que um servidor possa monopolizar a rede, na situação em que dois servidores que não possam transmitir simultaneamente 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. Admite-se que este procedimento é controlado pelo protocolo de múltiplo acesso.

3.6.1 - Modo A[Half,Omni]

Neste modo apenas um servidor pode transmitir em um dado momento e não existem paradas no meio da rede, como descrito na Seção 2.3.1, logo, os servidores que estão no meio da rede, servidores *j* e *k*, não necessitam de *buffer*, pois os pacotes não param no meio da rede, assim, apenas o primeiro servidor, *i*, necessita de *buffer.* O conjunto de estados para este modo passa a ser definido como:

$$S=\{x \mid 0 \leq i,j,k \leq 1;\ i+j+k \leq 1;\ 0 \leq wi \leq b;\ \mathrm{wj}=0;\ wk=0;\ i+wi \leq b+1\} \quad (16)$$

3.6.1.1 - Diagrama de Transição de Estados

O estado inicial corresponde a $i=wi=j=wj=k=wk=0$. A seguir tem-se a descrição de todas as possíveis transições para este modo, considerando tamanho de *buffer*, *b*, variável.

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 um dos seguintes estados:

1. i+1(wi),j(wj),k(wk) se:
   - i=0, wi=0, j=0, wj=0, k=0 e wk=0, isto é, não existem pacotes na rede e o pacote que chega começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
2. i(wi+1),j(wj),k(wk) se:
   - i=1, $wi<b$, j=0, wj=0, k=0 e wk=0, isto é, o nó S está transmitindo para o nó 1 e o pacote que chega é colocado em espera no nó S, ou
   - i=0, $wi<b$, j=1, wj=0, k=0, wk=0, isto é, o nó 1 está transmitindo para o nó 2 e o pacote que chega é colocado em espera no nó S, ou
   - i=0, $wi<b$, j=0, wj=0, k=1, wk=0, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino e 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, leva o sistema para o seguinte estado:
   1. i-1(wi),j+1(wj),k(wk), se:
      - i=1, $wi\leq b$, j=0, wj=0, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2.

c) A transmissão de um pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o seguinte estado:
   1. i(wi),j-1(wj),k+1(wk), se:
      - i=0, $wi\leq b$, j=1, wj=0, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino.

d) A transmissão de um pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para um dos seguintes estados:
   1. i(wi),j(wj),k-1(wk), se:
      - i=0, wi=0, j=0, wj=0, k=1 e wk=0, isto é, a transmissão do nó 2 para o nó destino é concluída com sucesso.
   2. i+1(wi-1),j(wj),k-1(wk), se:

- i=0, wi>0, j=0, wj=0, k=1 e wk=0, isto é, a transmissão do nó 2 para o nó destino é concluída com sucesso e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.

Nos estados onde $wi=b$ haverá o bloqueio de um novo pacote que chegar à rede.

3.6.2 - Modo B[Full,Omni]

Nesse modo todos os servidores necessitam de *buffer*. Os servidores i e k não podem transmitir simultaneamente, logo, sempre que um transmite um pacote dá prioridade ao outro para transmitir também um pacote, caso o mesmo tenha pacotes por transmitir. O conjunto de estados fica definido como:

$$S=\{x \mid 0 \le i,j,k \le 1; i+j+k \le 2; i+k \le 1; 0 \le wi,wj,wk \le b; i+wi \le b+1; j+wj \le b+1; k+wk \le b+1\} \quad (17)$$

3.6.2.1 - Diagrama de Transição de Estados

O estado inicial corresponde a $i=wi=j=wj=k=wk=0$. A seguir tem-se a descrição de todas as possíveis transições para este modo, considerando tamanho de *buffer*, b, variável.

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 um dos seguintes estados:
   1. $i+1(wi),j(wj),k(wk)$, se:
      - i=0, wi=0, $j \le 1$, $wj \le b$, k=0 e wk=0, isto é, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 e o pacote que chega começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
   2. $i(wi+1),j(wj),k(wk)$ se:
      - i=1, $wi<b$, $j \le 1$, $wj \le b$, k=0 e $wk \le b$, isto é, o nó S está transmitindo para o nó 1, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 e o pacote que chega é colocado em espera no nó S, ou
      - i=0, $wi<b$, $j \le 1$, $wj \le b$, k=1 e $wk \le b$, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 e 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, leva o sistema para um dos seguintes estados:

1. i-1(wi),j+1(wj),k(wk), se:
   - i=1, wi=0, j=0, wj=0, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2.
2. i(wi-1),j+1(wj),k(wk), se:
   - i=1, wi>0, j=0, wj=0, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso, o pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2 e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.
3. i-1(wi),j(wj+1),k(wk), se:
   - i=1, wi=0, j=1, wj<b, k=0 e wk=0, isto é, o nó 1 está transmitindo para o nó 2, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso e o pacote é colocado em espera no nó 1.
4. i(wi-1),j(wj+1),k(wk), se:
   - i=1, wi>0, j=1, wj<b, k=0 e wk=0, isto é, o nó 1 está transmitindo para o nó 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 S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.
5. i-1(wi),j+*1*(wj),k+1(wk-1), se:
   - i=1, wi≤b, j=0, wj=0, k=0 e wk>0, isto é, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso, e o pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2 e o nó 2 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó destino.
6. i-1(wi),j(wj+1),k+1(wk-1), se:
   - i=1, wi≤b, j=1, wj<b, k=0 e wk>0, isto é, o nó 1 está transmitindo para o nó 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 nó destino.
7. i-1(wi),j(wj),k(wk), se:

- i=1, wi=0, j=1, wj=b, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída sem sucesso e o pacote é descartado no nó 1, pois o seu *buffer* está cheio.

8. $i(wi\text{-}1),j(wj),k(wk)$, se:
   - i=1, wi>0, j=1, wj=b, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 1, pois o seu *buffer* está cheio e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.
9. $i\text{-}1(wi),j(wj),k+1(wk\text{-}1)$, se:
   - i=1, $wi \leq b$, j=1, wj=b, k=0 e wk>0, isto é, a transmissão do nó S para o nó 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 nó destino.

c) A transmissão de um pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para um dos seguintes estados:

1. $i(wi),j\text{-}1(wj),k+1(wk)$, se:
   - i=0, wi=0, j=1, wj=0, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino.
2. $i(wi),j\text{-}1(wj),k(wk+1)$, se:
   - i=1, $wi \leq b$, j=1, wj=0, k=0 e wk<b, isto é, o nó S está transmitindo para o nó 1, a transmissão do nó 1 para o nó 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 e wk<b, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso e o pacote é colocado em espera no nó 2.
3. $i(wi),j(wj\text{-}1),k+1(wk)$, se:
   - i=0, wi=0, j=1, wj>0, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino, o nó 1 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 2.

4. $i(wi),j(wj\text{-}1),k(wk+1)$, se:
   - $i=1$, $wi \leq b$, $j=1$, $wj>0$, $k=0$ e $wk<b$, isto é, o nó S está transmitindo para o nó 1, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso 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
   - $i=0$, $wi \leq b$, $j=1$, $wj>0$, $k=1$ e $wk<b$, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso 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.
5. $i(wi),j\text{-}1(wj),k(wk)$, se:
   - $i=1$, $wi \leq b$, $j=1$, $wj=0$, $k=0$ e $wk=b$, isto é, o nó S está transmitindo para o nó 1, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída sem sucesso e o pacote é descartado no nó 2, pois o seu *buffer* está cheio, ou
   - $i=0$, $wi \leq b$, $j=1$, $wj=0$, $k=1$ e $wk=b$, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída sem sucesso e o pacote é descartado no nó 2, pois o seu *buffer* está cheio.
6. $i(wi),j(wj\text{-}1),k(wk)$, se:
   - $i=1$, $wi \leq b$, $j=1$, $wj>0$, $k=0$ e $wk=b$, isto é, o nó S está transmitindo para o nó 1, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 2, pois o seu *buffer* está cheio, e o o nó 1 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 2, ou
   - $i=0$, $wi \leq b$, $j=1$, $wj>0$, $k=1$ e $wk=b$, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída sem sucesso, o pacote é descartado no nó 2, pois o seu *buffer* está cheio, e 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 nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para um dos seguintes estados:
   1. $i(wi),j(wj),k\text{-}1(wk)$, se:
      - $i=0$, $wi=0$, $j \leq 1$, $wj \leq b$, $k=1$ e $wk=0$, isto é, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2 e a transmissão do nó 2 para o nó destino é concluída com sucesso.

2. i+1(wi-1),j(wj),k-1(wk), se:
   - i=0, wi>0, j≤1, wj≤b, k=1 e wk≤b, isto é, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2, a transmissão do nó 2 para o nó destino é concluída com sucesso e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.
3. i(wi),j(wj),k(wk-1), se:
   - i=0, wi=0, j≤1, wj≤b, k=1 e wk>0, isto é, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2, a transmissão do nó 2 para o nó destino é concluída com sucesso e o nó 2 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó destino.

Nos estados onde wi=b haverá o bloqueio de um novo pacote que chegar à rede.

3.6.3 - Modo C[Half,Direc]

Neste modo apenas os servidores i e k podem transmitir ao mesmo tempo e o servidor k não utiliza o seu *buffer*, pois sempre que recebe um pacote do servidor j pode logo transmiti-lo e, enquanto o faz, o servidor j não pode transmitir, pois os dois não podem transmitir ao mesmo tempo. Então, apenas os servidores i e j necessitam de *buffer*. O conjunto de estados fica definido como:

$$S=\{x \mid 0 \le i,j,k \le 1; i+j+k \le 2; i+j \le 1; j+k \le 1; 0<=wi,wj<=b; wk=0; i+wi \le b+1; j+wj \le b+1\} \quad (18)$$

3.6.3.1 - Diagrama de Transição de Estados

O estado inicial corresponde a i=wi=j=wj=k=wk=0. A seguir tem-se a descrição de todas as possíveis transições para este modo, considerando tamanho de *buffer*, b, variável.

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 um dos seguintes estados:
   1. i+1(wi),j(wj),k(wk), se:
      - i=0, wi=0, j=0, wj=0, k=0 e wk=0, isto é, não existem pacotes na rede e o pacote que chega começa a ser transmitido do nó S para o nó 1, ou

- i=0, wi=0, j=0, $wj \leq b$, k=1 e wk=0, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino e o pacote que chega começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.

2. $i(wi+1),j(wj),k(wk)$ se:
   - i=1, $wi<b$, j=0, $wj \leq b$, $k \leq 1$ e wk=0, isto é, o nó 2 pode estar transmitindo para o nó destino, o nó S está transmitindo para o nó 1 e o pacote que chega é colocado em espera no nó S, ou
   - i=0, $wi<b$, j=1, $wj \leq b$, k=0 e wk=0, isto é, o nó 1 está transmitindo para o nó 2 e 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, leva o sistema para um dos seguintes estados:

1. $i\text{-}1(wi),j+1(wj),k(wk)$, se:
   - i=1, $wi \leq b$, j=0, $wj \leq b$, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2.
2. $i\text{-}1(wi),j(wj+1),k(wk)$, se:
   - i=1, wi=0, j=0, $wj<b$, k=1 e wk=0, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso e o pacote é colocado em espera no nó 1.
3. $i(wi\text{-}1),j(wj+1),k(wk)$, se:
   - i=1, $wi>0$, j=0, $wj<b$, k=1 e wk=0, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso e o pacote é colocado em espera no nó 1, e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.
4. $i\text{-}1(wi),j(wj),k(wk)$, se:
   - i=1, wi=0, j=0, $wj=b$, k=1 e wk=0, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída sem sucesso e o pacote é descartado no nó 1, pois o seu *buffer* está cheio.
5. $i(wi\text{-}1),j(wj),k(wk)$, se:

- i=1, wi>0, j=0, wj=b, k=1 e wk=0, isto é, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída sem sucesso e o pacote é descartado no nó 1, pois o seu *buffer* está cheio; o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.

c) A transmissão de um pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para um dos seguintes estados:

1. $i(wi)$,j-1(wj),k+1(wk), se:
   - i=0, wi=0, j=1, $wj \leq b$, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino.
2. i+1$(wi$-1$)$,j-1(wj),k+1(wk), se:
   - i=0, wi>0, j=1, $wj \leq 0$, k=0 e wk=0, isto é, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso, o pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.

d) A transmissão de um pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para um dos seguintes estados:

1. $i(wi)$,$j(wj)$,k-1(wk), se:
   - $i \leq 1$, $wi \leq b$, j=0, wj=0, k=1 e wk=0, isto é, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1 e a transmissão do nó 2 para o nó destino é concluída com sucesso, ou
   - i=1, $wi \leq b$, j=0, wj>0, k=1 e wk=0, isto é, o nó S está transmitindo para o nó 1 e a transmissão do nó 2 para o nó destino é concluída com sucesso.
2. $i(wi)$,j+1$(wj$-1$)$,k-1(wk), se:
   - i=0, wi=0, j=0, wj>b, k=1 e wk=0, isto é, a transmissão do nó 2 para o nó destino é concluída com sucesso e o nó 1 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 2.

Nos estados onde wi=b haverá o bloqueio de um novo pacote que chegar à rede.

3.6.4 - Modo D[Full,Direc]

Neste modo todos os servidores podem receber e transmitir ao mesmo tempo, devido ao modo *full duplex* e aos tipos de antenas utilizadas, logo, todos os servidores precisam de *buffer*. O conjunto de estados fica definido como:

$$S=\{x \mid 0 \le i,j,k \le 1\,; i+j+k \le 3\,; 0 \le wi,wj,wk \le b\,;\ \mathrm{i+wi} \le \mathrm{b+1}\,; j+wj \le \mathrm{b+1}\,; k+wk \le \mathrm{b+1}\} \quad (19)$$

3.6.4.1 - Diagrama de Transição de Estados

O estado inicial corresponde a $i=wi=j=wj=k=wk=0$. A seguir tem-se a descrição de todas as possíveis transições para este modo, considerando tamanho de *buffer*, *b*, variável.

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 um dos seguintes estados:
   1. $i+1(wi),j(wj),k(wk)$, se:
      - $i=0$, $wi=0$, $j\le 1$, $wj\le b$, $k\le 1$ e $wk\le b$, isto é, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2, o nó 2 pode estar transmitindo para o nó destino e o pacote que chega começa a ser transmitido do nó S para o nó 1.
   1. $i(wi+1),j(wj),k(wk)$ se:
      - $i=1$, $wi<b$, $j\le 1$, $wj\le b$, $k\le 1$ e $wk\le b$, isto é, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2, o nó 2 pode estar transmitindo para o nó destino e 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, leva o sistema para um dos seguintes estados:
   1. $i-1(wi),j+1(wj),k(wk)$, se:
      - $i=1$, $wi=0$, $j=0$, $wj=0$, $k\le 1$ e $wk\le b$, isto é, o nó 2 pode estar transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso, o pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2.
   2. $i(wi-1),j+1(wj),k(wk)$, se:
      - $i=1$, $wi>0$, $j=0$, $wj=0$, $k\le 1$ e $wk\le b$, isto é, o nó 2 pode estar transmitindo para o nó destino e a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso, o pacote começa a ser transmitido do nó 1

para o nó 2 e o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.

3. i-1(wi),j(wj+1),k(wk), se:
   - i=1, wi=0, j=1, $wj<b$, $k\leq 1$ e $wk\leq b$, isto é, o nó 1 está transmitindo para o nó 2, o nó 2 pode estar transmitindo para o nó destino e a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída com sucesso, o pacote é colocado em espera no nó 1.
4. i(wi-1),j(wj+1),k(wk), se:
   - i=1, $wi>0$, j=1, $wj<b$, $k\leq 1$ e $wk\leq b$, isto é, o nó 1 está transmitindo para o nó 2, o nó 2 pode estar transmitindo para o nó destino, 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 S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.
5. i-1(wi),j(wj),k(wk), se:
   - i=1, wi=0, j=1, $wj=b$, $k\leq 1$ e $wk\leq b$, isto é, o nó 1 está transmitindo para o nó 2, o nó 2 pode estar transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída sem sucesso e o pacote é descartado no nó 1, pois o seu *buffer* está cheio.
6. i(wi-1),j(wj),k(wk), se:
   - i=1, $wi>0$, j=1, $wj=b$, $k\leq 1$ e $wk\leq b$, isto é, o nó 1 está transmitindo para o nó 2, o nó 2 pode estar transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó S para o nó 1 é concluída sem sucesso e o pacote é descartado no nó 1, pois o seu *buffer* está cheio, o nó S retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 1.

c) A transmissão de um pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para um dos seguintes estados.

1. i(wi),j-1(wj),k+1(wk), se:
   - $i\leq 1$, $wi\leq b$, j=1, wj=0, k=0 e wk=0, isto é, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino.

2. $i(wi),j\text{-}1(wj),k(wk+1)$, se:
   - $i\leq 1$, $wi\leq b$, $j=1$, $wj=0$, $k=1$ e $wk<b$, isto é, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso e o pacote é colocado em espera no nó 2.
3. $i(wi),j(wj\text{-}1),k+1(wk)$, se:
   - $i\leq 1$, $wi\leq b$, $j=1$, $wj>0$, $k=0$ e $wk=0$, isto é, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso e o pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino, o nó 1 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó 2.
4. $i(wi),j(wj\text{-}1),k(wk+1)$, se:
   - $i\leq 1$, $wi\leq b$, $j=1$, $wj>0$, $k=1$ e $wk<b$, isto é, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída com sucesso e o pacote é colocado em espera no nó 2, o nó 1 retira um pacote do *buffer* e começa a transmitir para o nó 2.
5. $i(wi),j\text{-}1(wj),k(wk)$, se:
   - $i\leq 1$, $wi\leq b$, $j=1$, $wj=0$, $k=1$ e $wk=b$, isto é, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída sem sucesso e o pacote é descartado no nó 2, pois o seu *buffer* está cheio.
6. $i(wi),j(wj\text{-}1),k(wk)$, se:
   - $i\leq 1$, $wi\leq b$, $j=1$, $wj>0$, $k=1$ e $wk=b$, isto é, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1, o nó 2 está transmitindo para o nó destino, a transmissão do nó 1 para o nó 2 é concluída sem sucesso e o pacote é descartado no nó 2, pois o 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 nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para um dos seguintes estados.

1. $i(wi),j(wj),k\text{-}1(wk)$, se:

- $i \leq 1$, $wi \leq b$, $j \leq 1$, $wj \leq b$, $k=1$ e $wk=0$, isto é, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2, a transmissão do nó 2 para o nó destino é concluída com sucesso.

2. i(wi),j(wj),k(wk-1), se:
   - $i \leq 1$, $wi \leq b$, $j \leq 1$, $wj \leq b$, $k=1$ e $wk>0$, isto é, o nó S pode estar transmitindo para o nó 1, o nó 1 pode estar transmitindo para o nó 2, a transmissão do nó 2 para o nó destino é concluída com sucesso e o nó 2 retira um pacote em espera e começa a transmitir para o nó destino.

Nos estados onde $wi=b$ haverá o bloqueio de um novo pacote que chegar à rede.

3.6.5 - Diagramas de Transição de Estados com *Buffer* = 1

Para ilustrar o método, seguem-se os diagramas de transição de estados dos modos A[Half,Omni], B[Full,Omni] e C[Half,Direc] para *buffer*=1 e a descrição detalhada para o modo A[Half,Omni]. O diagrama do modo D[Full,Omni] e a descrição detalhada dos outros modos foram omitidas pela complexidade dos diagramas e pelo fato da solução dos modelos ter se baseado na descrição genérica para *buffer* de tamanho *b* previamente apresentada e não nos diagramas de transição de estados.

3.6.5.1 - Modo A[Half,Omni]

A Figura 18 apresenta o diagrama de estados do modo A[Half,Omni] com *buffer* igual a 1. O estado inicial do sistema é o estado 0(0),0(0),0(0), em que 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 pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, 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 1(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(1),0(0),0(0), onde este pacote é colocado em espera no nó S.

4 – No estado 0(0),1(0),0(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(0),0(0),1(0), onde este pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino.

5 – 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 0(1),1(0),0(0), onde este pacote é colocado em espera no nó S.

6 – No estado 1(1),0(0),0(0), a transmissão do pacote do nó S para o nó 1, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(1),1(0),0(0), onde este pacote começa a ser transmitido do nó 1 para o nó 2.

7 – No estado 0(0),0(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado inicial 0(0),0(0),0(0), em que não há nenhum pacote na rede.

8 – 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.

9 – No estado 0(1),1(0),0(0), a transmissão do pacote do nó 1 para o nó 2, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 0(1),0(0),1(0), onde este pacote começa a ser transmitido do nó 2 para o nó destino.

10 – No estado 0(1),0(0),1(0), a transmissão do pacote do nó 2 para o nó destino, que ocorre com taxa μ, leva o sistema para o estado 1(0),0(0),0(0), onde o pacote em espera no nó S começa a ser transmitido para o nó 1.

No estado 1(1),0(0),0(0) haverá o bloqueio de um novo pacote que chegar no nó S, pois apenas dois pacotes podem estar em um servidor.

Nos estados 0(1),1(0),0(0) e 0(1),0(0),1(0) haverá o bloqueio de um novo pacote que chegar no nó S, pois o seu *buffer* está cheio e não pode transmitir enquanto outro servidor está transmitindo.

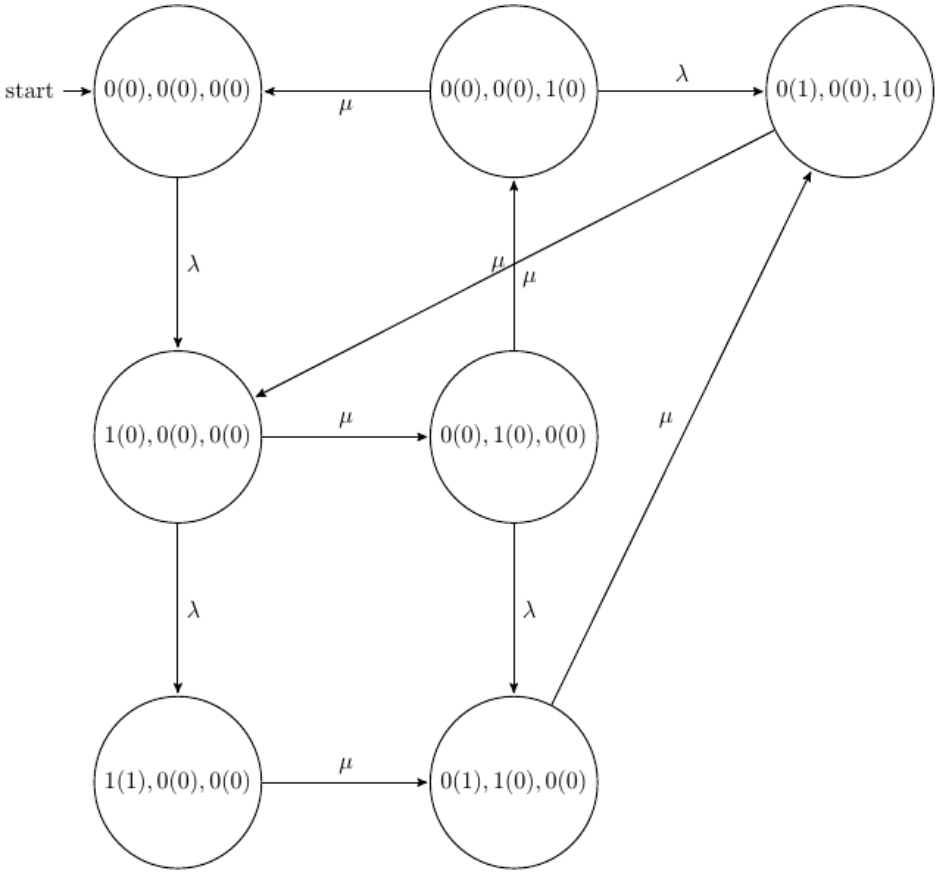

Figura 18: Diagrama de transição de estados modoA[Half,Omni], buffer=1.

3.6.5.2 - Modo B[Full,Omni]

A Figura 19 apresenta o diagrama de estados do modo B[Full,Omni] com *buffer* igual a 1.

Figura 19: Diagrama de transição de estados modoB[Full,Omni], buffer=1.

3.6.5.3 - Modo C[Half,Direc]

A Figura 20 apresenta o diagrama de estados do modo C[Half,Direc] com *buffer* igual a 1.

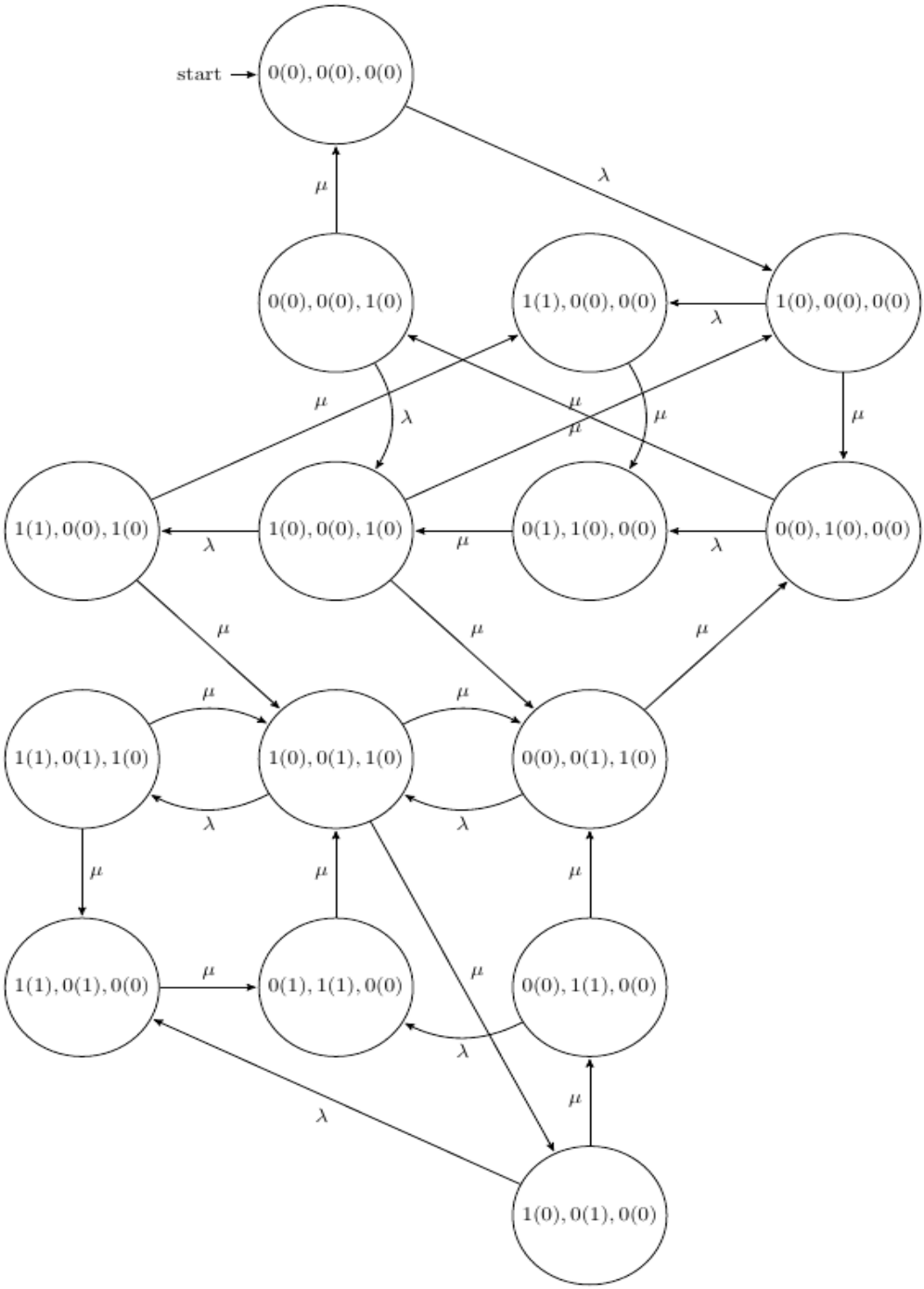

Figura 20: Diagrama de transição de estados modoC[Half,Direc], buffer=1.

3.7- Métricas de Desempenho para o Modelo com *Buffer*

Nesta sessão são apresentadas as métricas de desempenho dos modos de operação para o modelo com *buffer*, o desempenho de cada modo de operação, bem como a comparação entre eles. Os parâmetros utilizados nas análises são: taxa de chegada de pacote, λ, variando de 1 a 10 pac/s, taxa de serviço, μ, igual a 10 pac/s e quatro tamanhos de *buffer,* b=1, b=5, b=10 e b=20. Os valores das métricas de performance são todos normalizados, ou seja, não dependem de fato das taxas de dados, mas sim do fator de utilização, $\rho=\lambda/\mu$, que em todos os gráficos corresponde ao eixo x.

A) Probabilidade de Bloqueio

A probabilidade de bloqueio P representa o somatório das probabilidades dos estados onde o primeiro servidor não tem espaço para receber um novo pacote, ou seja, tem o *buffer* cheio. E é calculada por meio da Equação (20).

$$P=\sum_{x\in S}\pi(x),\quad Se\quad wi=b \tag{20}$$

Onde $\pi(x)$ representa a probabilidade do estado x e $wi=b$ significa que o *buffer* do servidor i é igual ao limite do *buffer*, ou seja, está cheio.

Na Figura 21 observa-se que a probabilidade de bloqueio do modo A[Half,Omni] diminui com o aumento do *buffer* de b=1 até b=5, mas se mantém praticamente inalterada, para $b\geq5$ quando $\rho\geq0.5$. Quando o ρ tende a 1, a probabilidade de bloqueio máxima tende para 2/3. Na Figura 22 observa-se que a probabilidade de bloqueio do modo B[Full,Omni] diminui com o aumento do *buffer* de b=1 até b=5, mas se mantém praticamente inalterada, para $b\geq5$ quando $\rho\geq0.7$. Quando o ρ tende a 1, a probabilidade de bloqueio máxima tende para 1/2. Na Figura 23 observa-se que a probabilidade de bloqueio do modo C[Half,Direc] diminui com o aumento do *buffer* e quando o ρ tende a 1, a probabilidade de bloqueio máxima tende para 1/3 quando $b\geq5$. Na Figura 24 observa-se que a probabilidade de bloqueio do modo D[Full,Direc] diminui com o aumento do *buffer* e quando $\rho\leq0.9$ e $b\geq10$ a probabilidade de bloqueio é inferior a 0.05. Nas Figuras 25, 26, 27 e 28, observa-se que os modos que utilizam antenas direcionais, têm uma menor probabilidade de bloqueio em relação aos modos que utilizam antenas omnidirecionais.

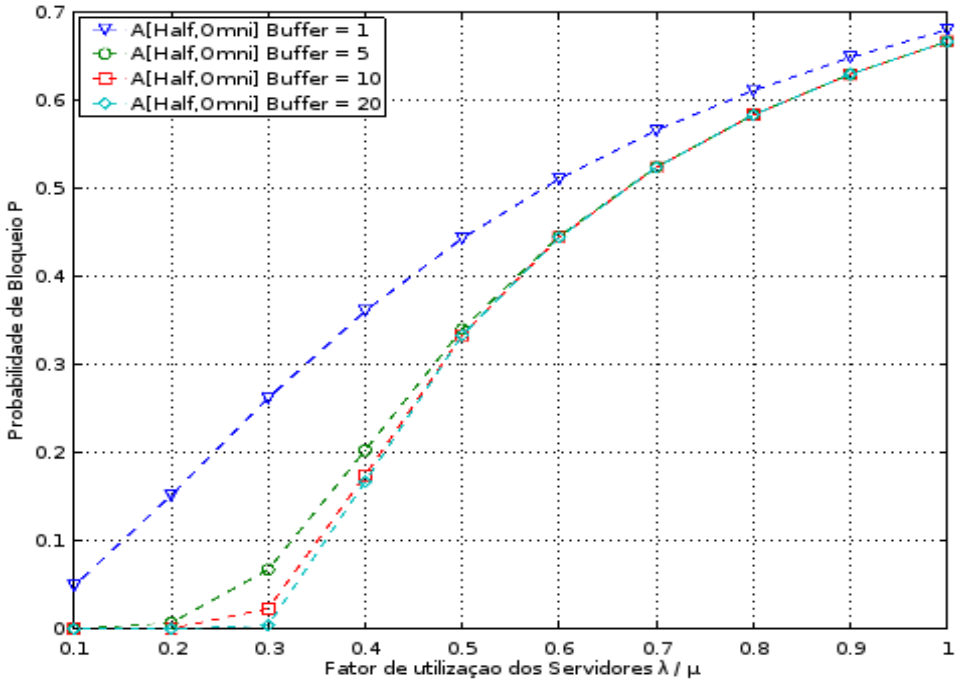

Figura 21: Modo A[Half,Omni] probabilidade de bloqueio.

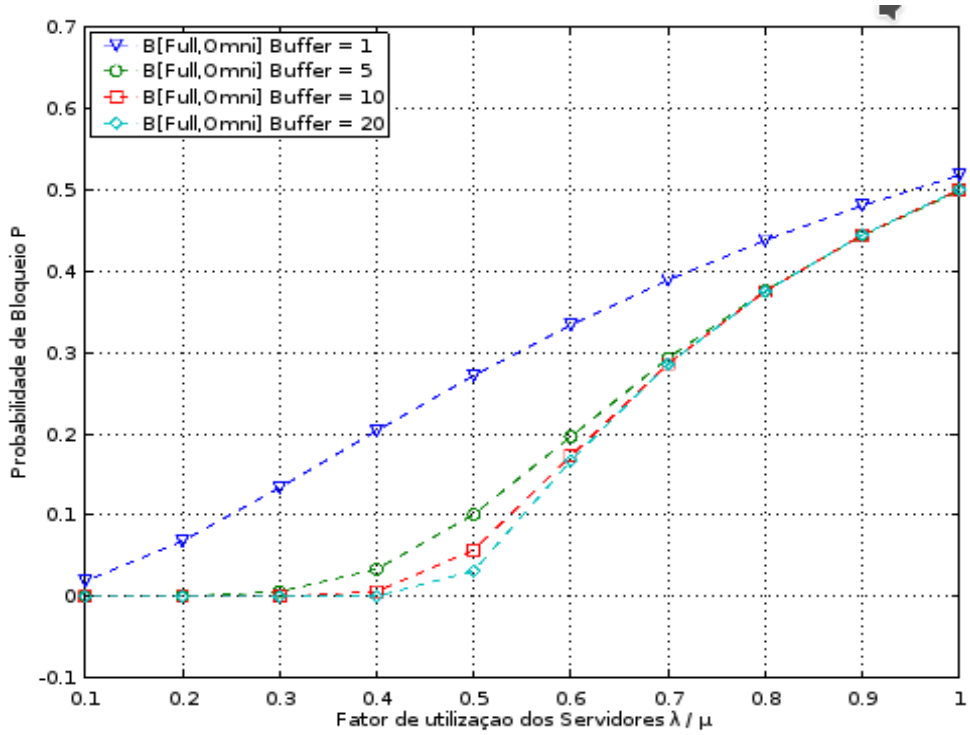

Figura 22: Modo B[Full,Omni] probabilidade de bloqueio.

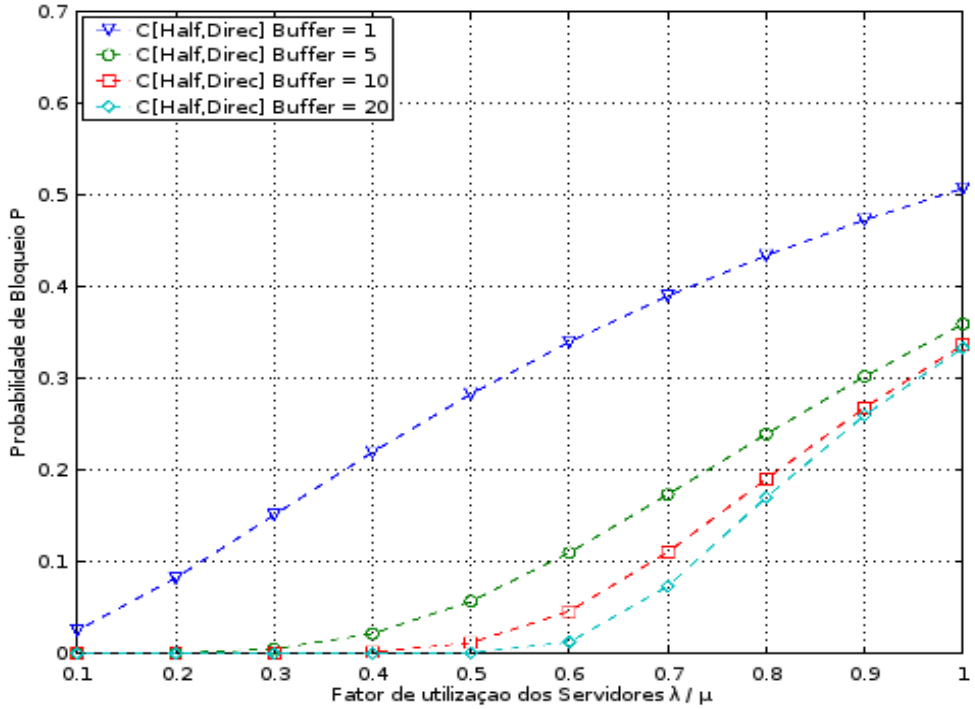

Figura 23: Modo C[Half,Direc] probabilidade de bloqueio.

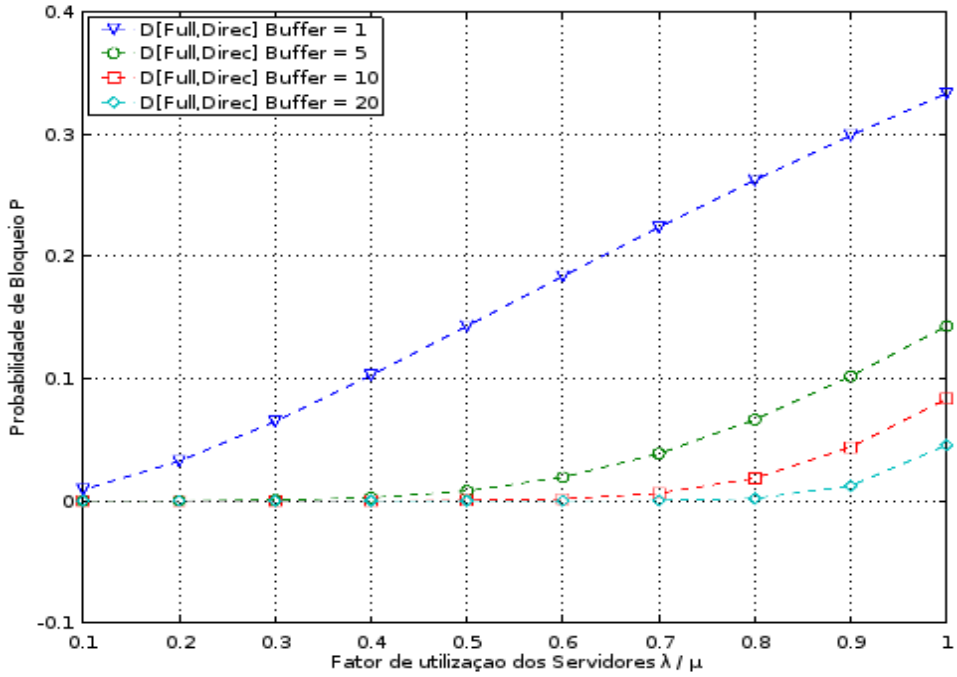

Figura 24: Modo D[Full,Direc] probabilidade de bloqueio.

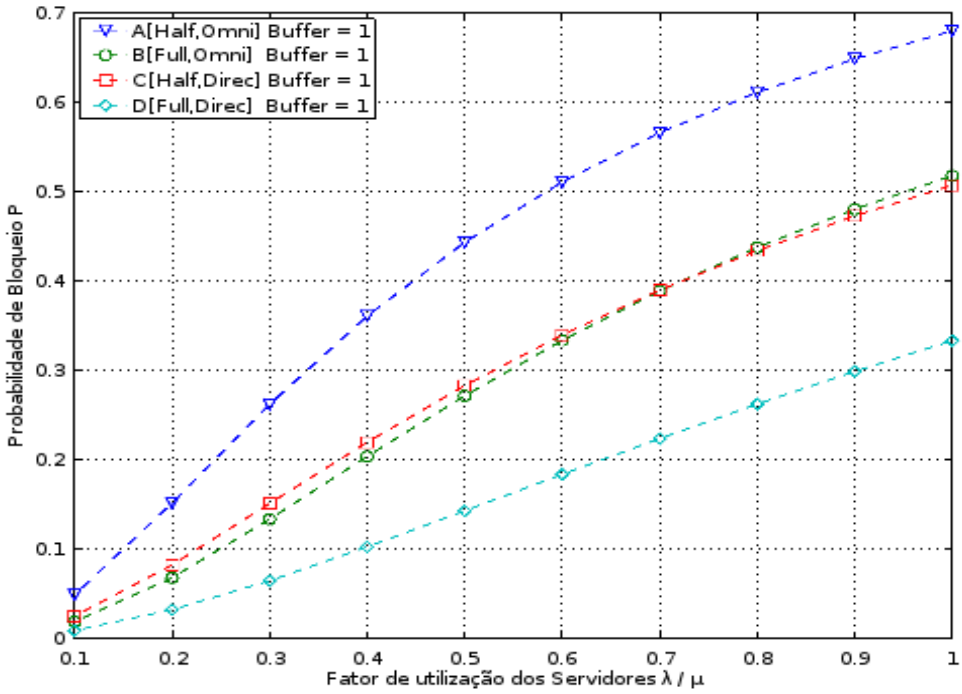

Figura 25: Probabilidade de bloqueio, buffer 1.

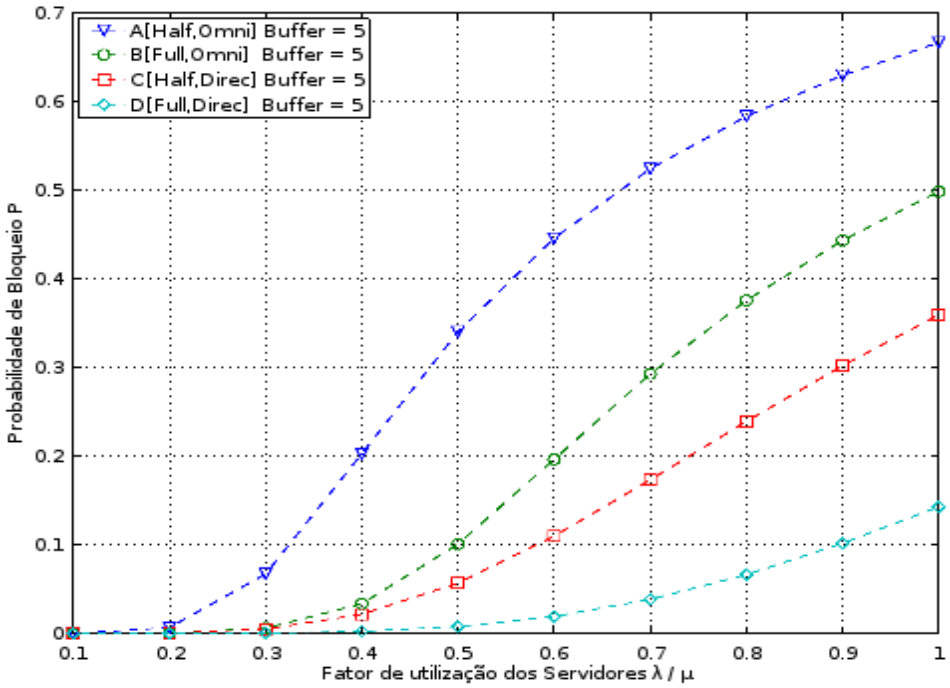

Figura 26: Probabilidade de bloqueio, buffer 5.

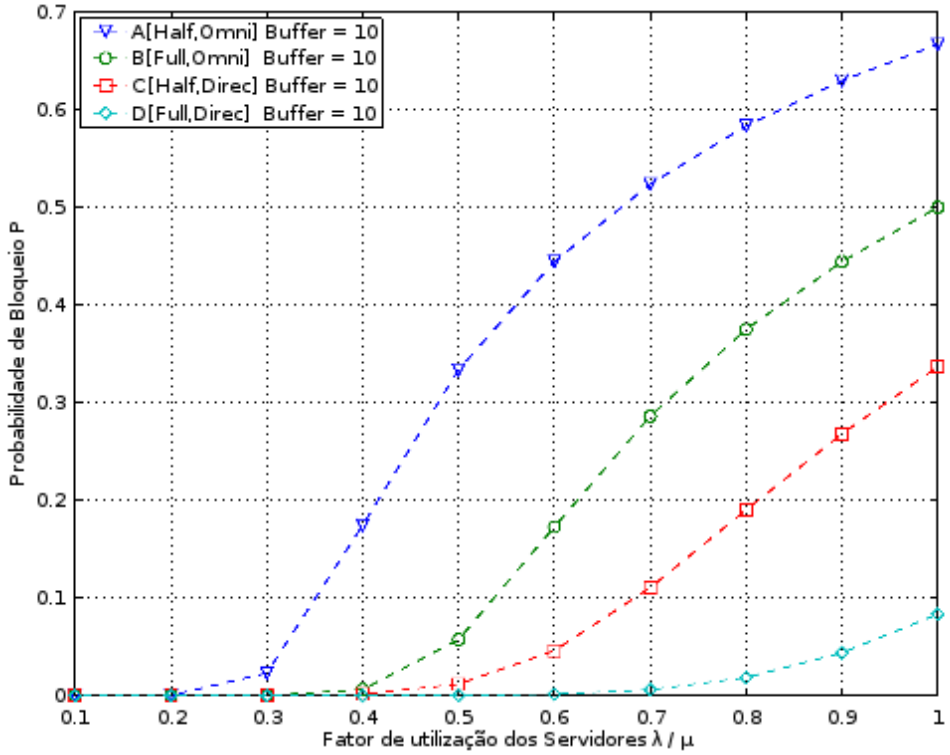

Figura 27: Probabilidade de bloqueio, buffer 10.

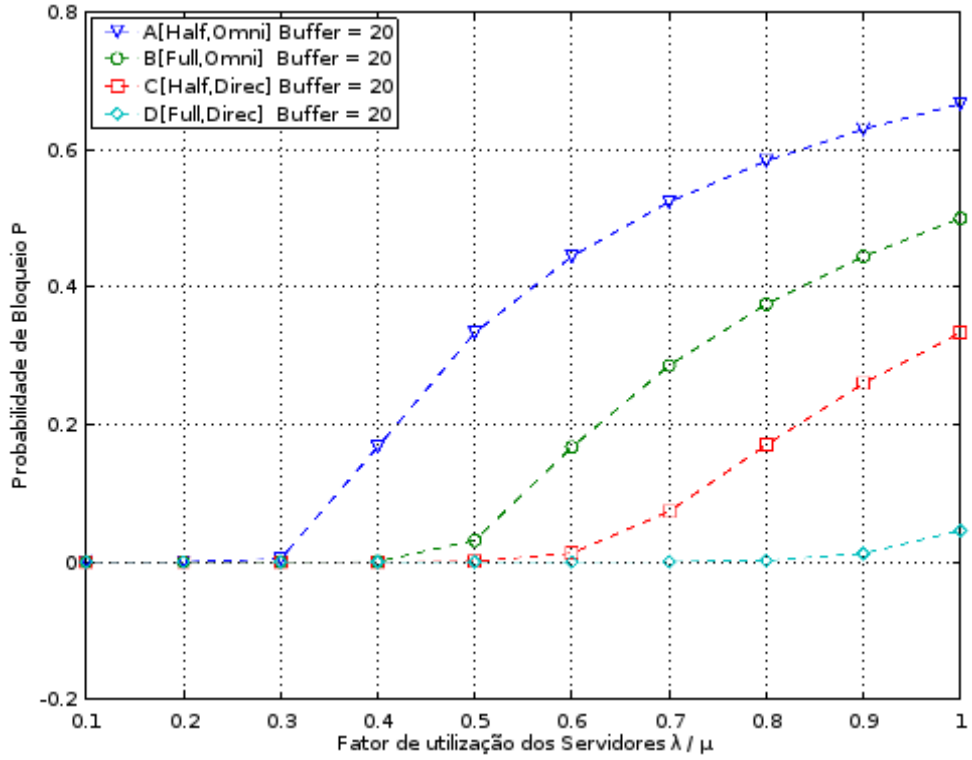

Figura 28: Probabilidade de bloqueio, buffer 20.

B) Probabilidade de Descarte

A probabilidade de descarte *D* continua a ser calculada da mesma maneira que no modelo sem *buffer*, ou seja:

$$D = 1 - Ps \tag{10}$$

onde *Ps* representa a probabilidade de um pacote que entrou na rede ser transmitido com sucesso até o destino, que é calculada pela razão entre a taxa média de pacotes que são transmitidos com sucesso, representados por *C*, e a taxa média de pacotes que entra na rede, dada pela Equação (11).

Na Figura 29 observa-se que a probabilidade de descarte do modo A[Half,Omni] continua a ser 0, como esperado.

Na Figura 30 observa-se que a probabilidade de descarte do modo B[Full,Omni] diminui com o aumento do *buffer* de b=1 até b=5 e para b≥5 ela é praticamente 0.

Na Figura 31 observa-se que a probabilidade de descarte do modo C[Half,Direc] diminui com o aumento do *buffer* quando ρ≤0.4, para ρ>0.4 a probabilidade de descarte aumenta com o aumento do *buffer,* pois com uma maior carga nos servidores o aumento do *buffer* faz com que o servidor *i* tenha sempre pacotes para transmitir para o servidor *j* inundando o seu *buffer,* pois sempre que o servidor *k* está a transmitir o servidor *i* pode transmitir ao servidor *j* que tem que aguardar que os servidores *i* e *k* terminem de transmitir para poder transmitir. Quando o ρ tende a 1, a probabilidade de descarte máxima tende para ½.

Na Figura 32 observa-se que a probabilidade de descarte do modo D[Full,Direc] diminui com o aumento do *buffer* e quando ρ≤0.9 e b≥10 a probabilidade de descarte é inferior a 0.05.

Nas Figuras 33, 34, 35 e 36, observa-se que os modos que utilizam transmissão *full duplex* têm uma maior diminuição na probabilidade de descarte com o aumento do *buffer.*

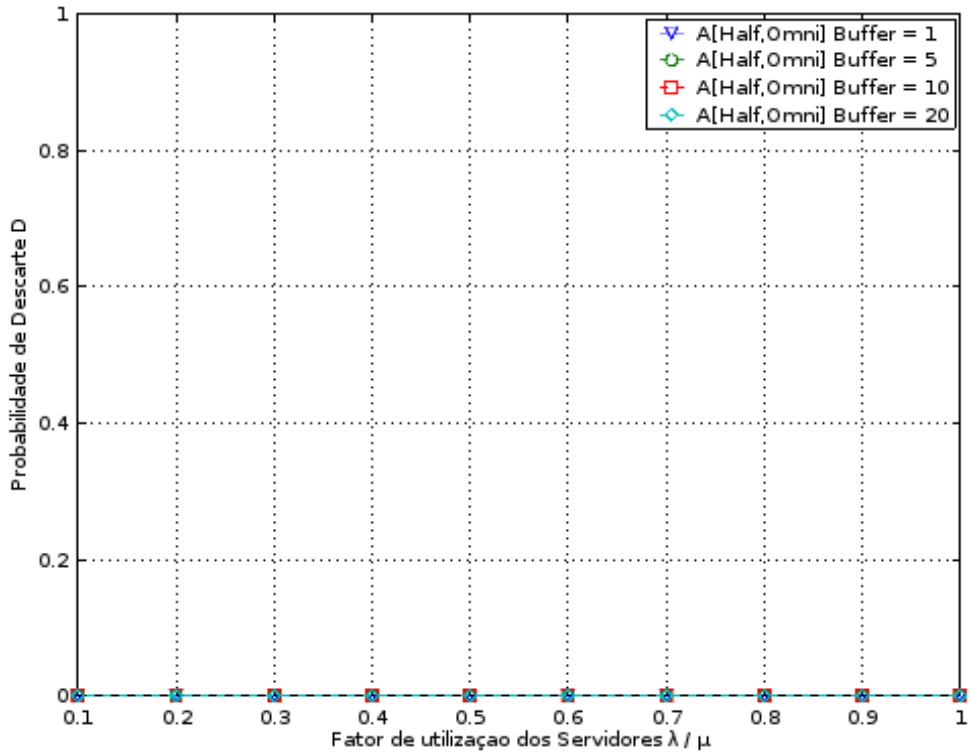

Figura 29: Modo A[Half,Omni] probabilidade de descarte.

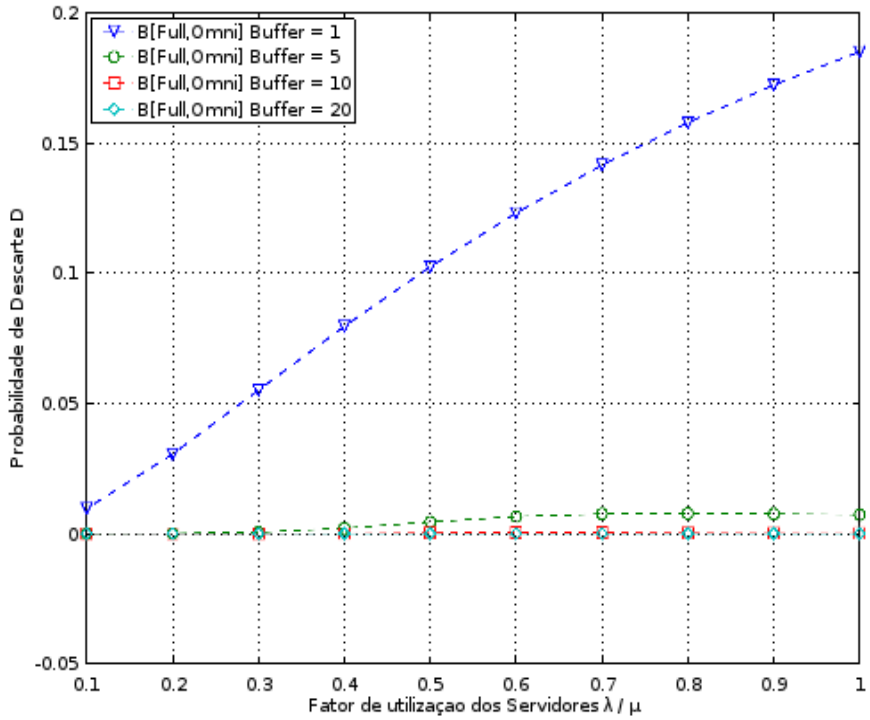

Figura 30: Modo B[Full,Omni] probabilidade de descarte.

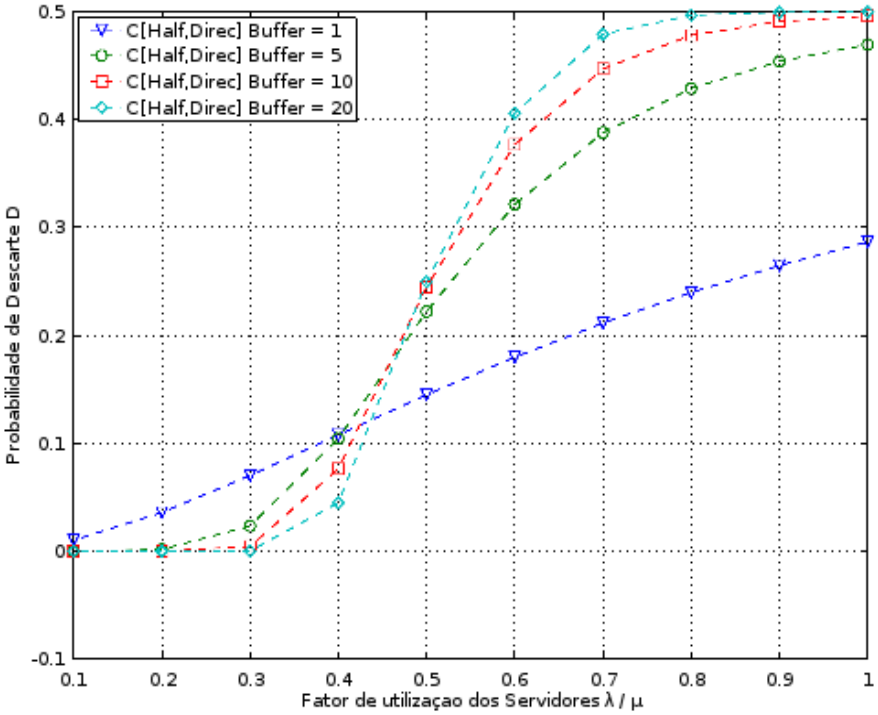

Figura 31: Modo C[Half,Direc] probabilidade de descarte.

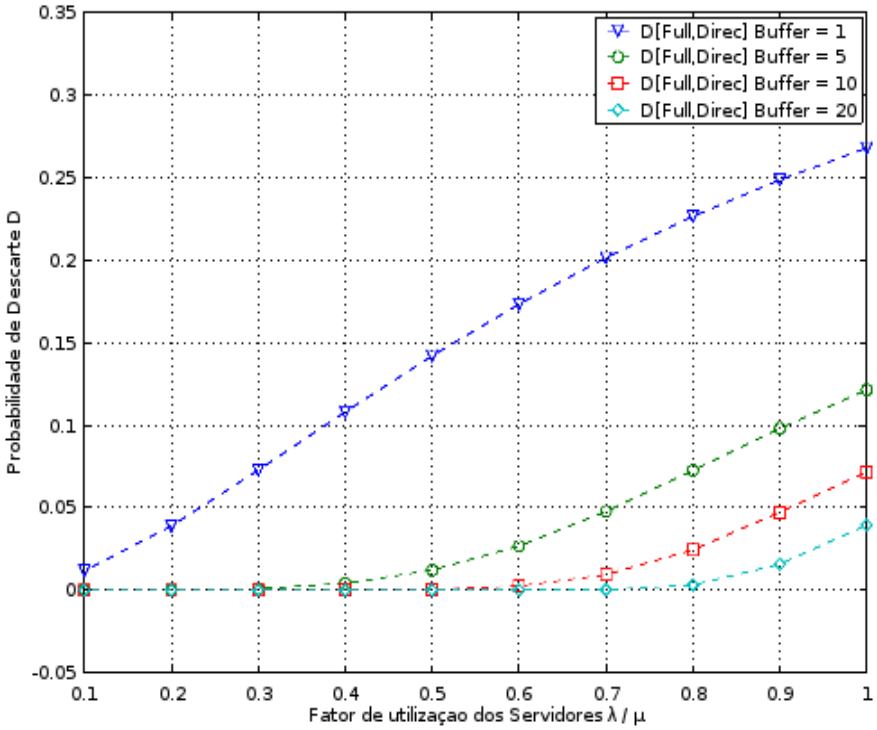

Figura 32: Modo D[Full,Direc] probabilidade de descarte.

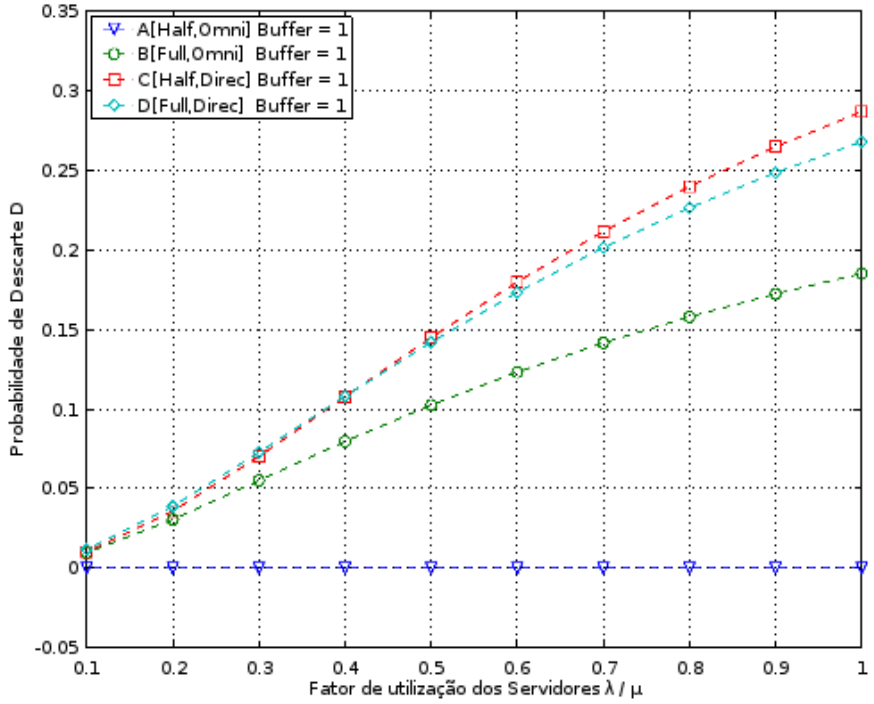

Figura 33: Probabilidade de descarte, buffer 1.

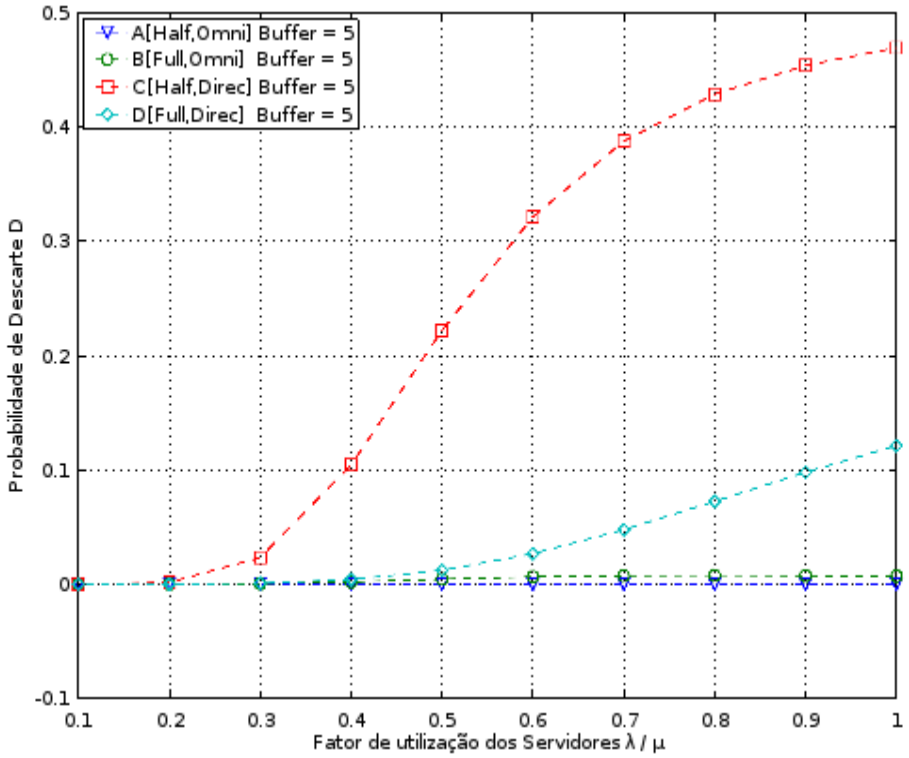

Figura 34: Probabilidade de descarte, buffer 5.

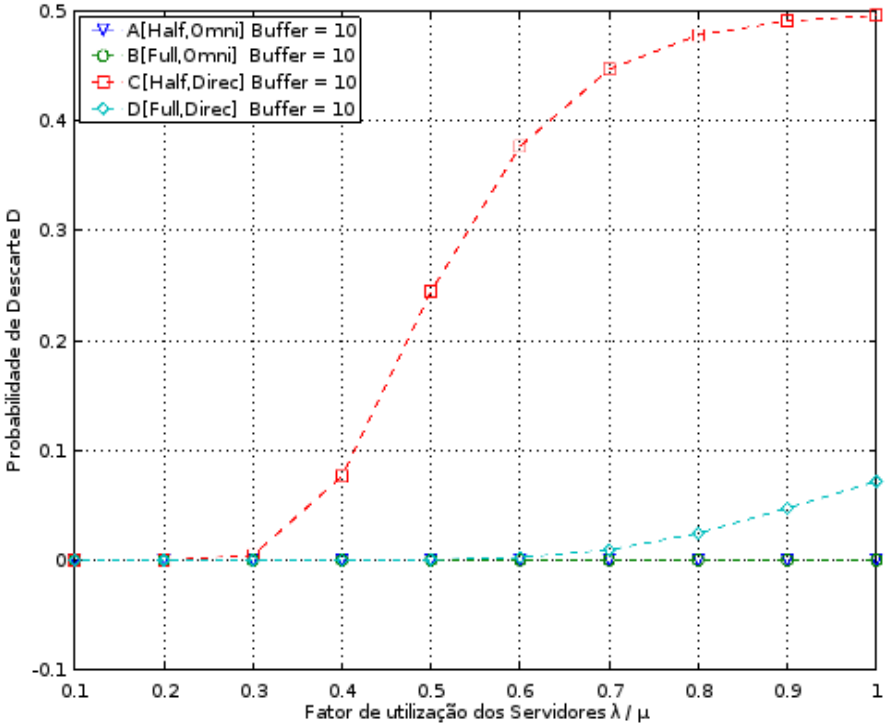

Figura 35: Probabilidade de descarte, buffer 10.

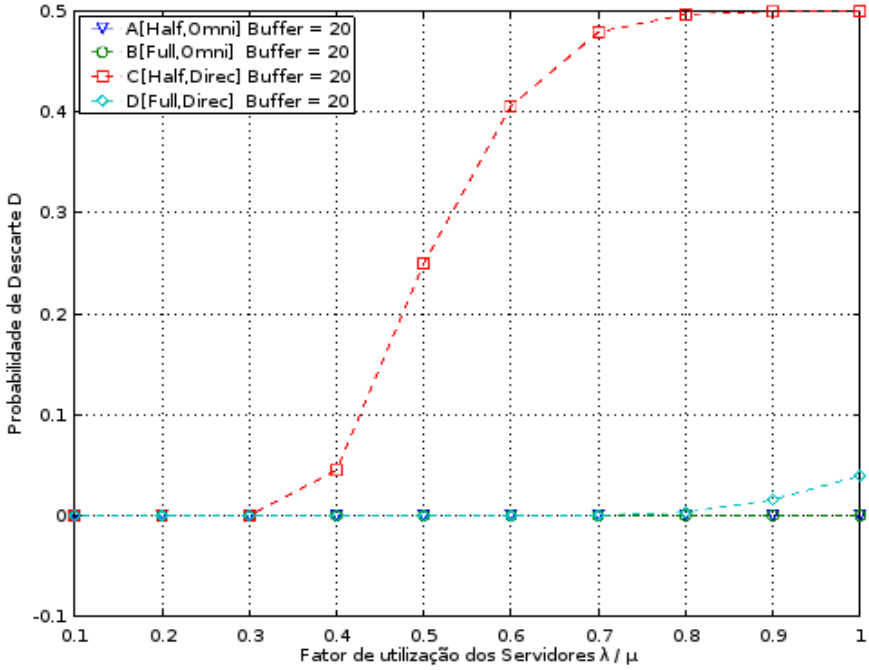

Figura 36: Probabilidade de descarte, buffer 20.

C) Capacidade

A capacidade, *C,* continua a ser calculada da mesma maneira que no modelo sem *buffer*, ou seja:

$$C = \sum_{x \in S} \pi(x)\mu, \quad Se \quad k=1 \tag{9}$$

onde $\pi(x)$ representa a probabilidade do estado *x* da cadeia, *k*=1 significa que nesse estado o servidor *k* está transmitindo um pacote e μ é a taxa de transmissão.

A capacidade é apresentada em percentagem da taxa de serviço μ=10 pacotes/s.

Na Figura 37 observa-se que a capacidade do modo A[Half,Omni] aumenta com o aumento do *buffer* de b=1 até b=5, mas se mantém praticamente inalterada, para b≥5 quando ρ≥0.5. Quando o ρ tende a 1, a capacidade tende para 1/3.

Na Figura 38 observa-se que a capacidade do modo B[Full,Omni] aumenta com o aumento do *buffer* de b=1 até b=5, mas se mantém praticamente inalterada, para b≥5 quando ρ≥0.7. Quando o ρ tende a 1, a capacidade tende para 1/2.

Na Figura 39 observa-se que a capacidade do modo C[Half,Direc] para b<5 aumenta com o aumento do *buffer,* para b≥5 e ρ≤0.4 também aumenta com o aumento do *buffer,* mas para b≥5 e ρ≥0.5 a capacidade diminui com o aumento do *buffer.*

Na Figura 40 observa-se que a capacidade do modo D[Full,Direc] aumenta com o aumento do *buffer.*

Nas Figuras 41, 42, 43 e 44, observa-se que os modos que utilizam transmissão *Full Duplex*, têm uma capacidade muito superior aos modos que utilizam transmissão *Half Duplex.*

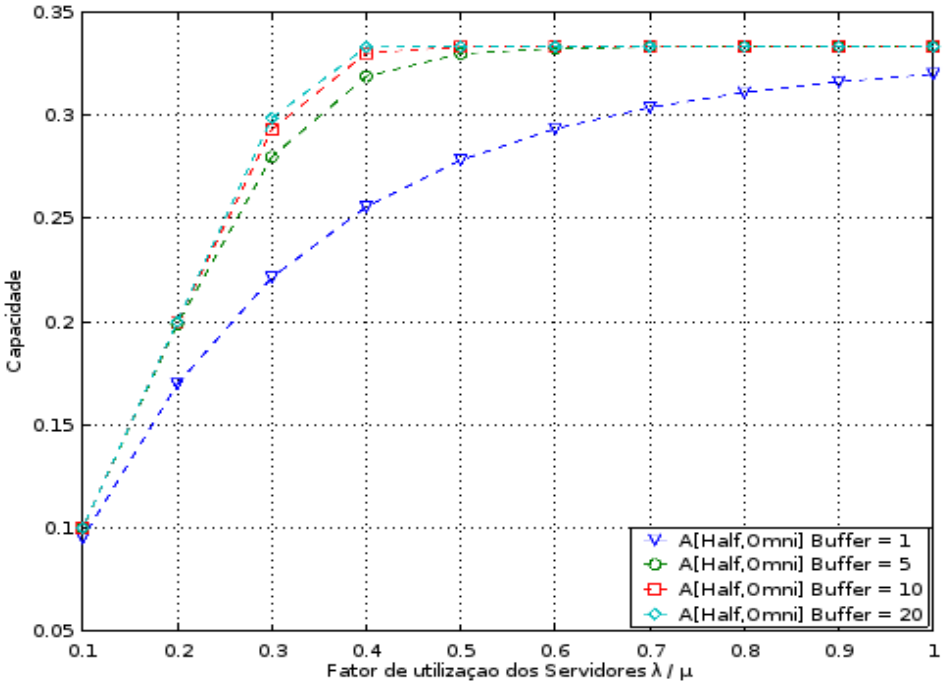

Figura 37: Modo A[Half,Omni] Capacidade do sistema / μ.

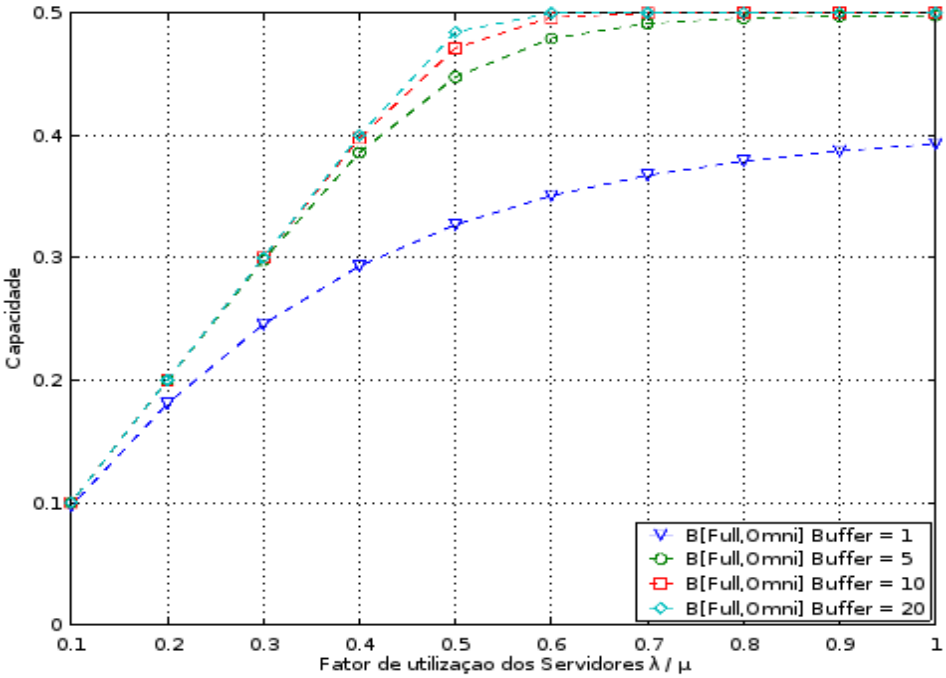

Figura 38: Modo B[Full,Omni] Capacidade do sistema / μ.

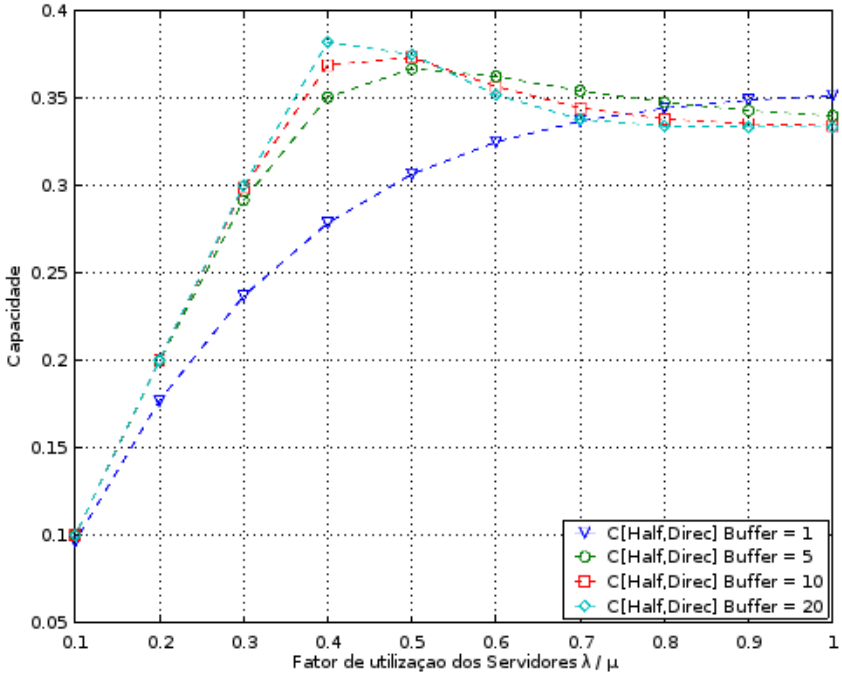

Figura 39: Modo C[Half,Direc] Capacidade do sistema / μ.

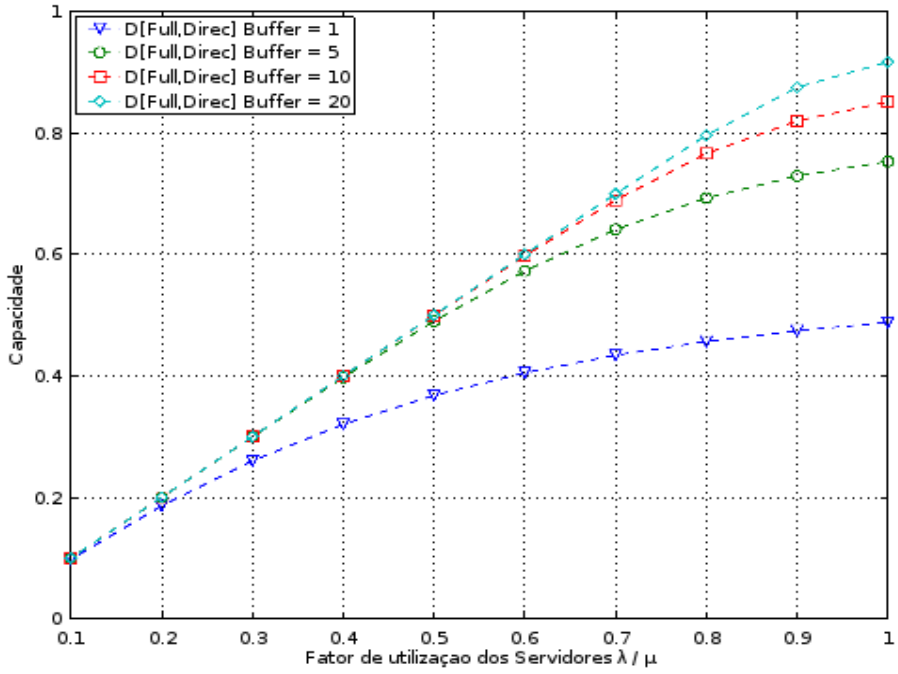

Figura 40: Modo D[Full,Direc] Capacidade do sistema / μ.

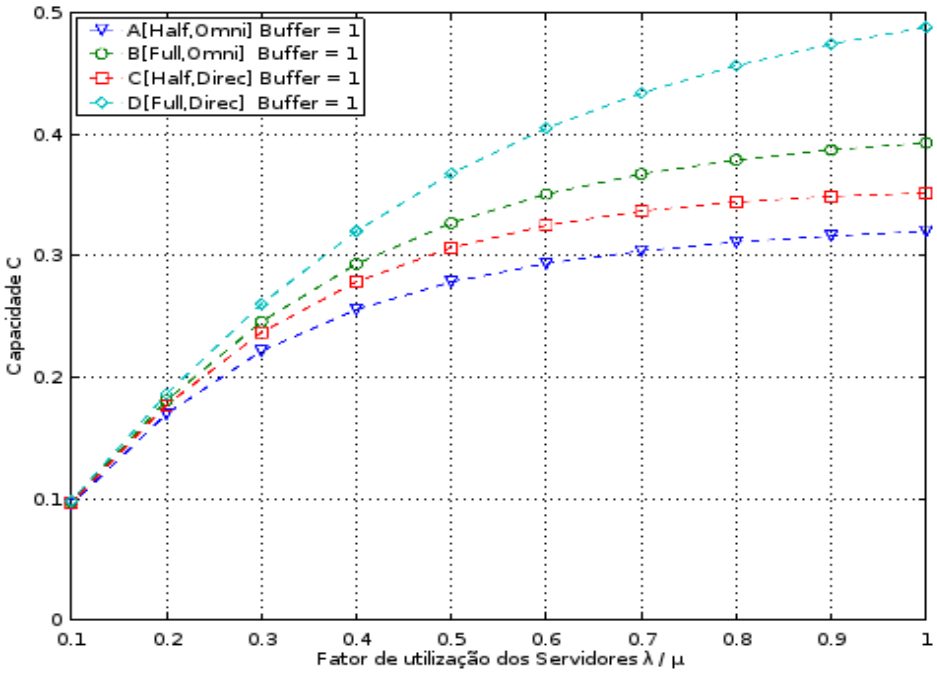

Figura 41: Capacidade do sistema / μ, buffer 1.

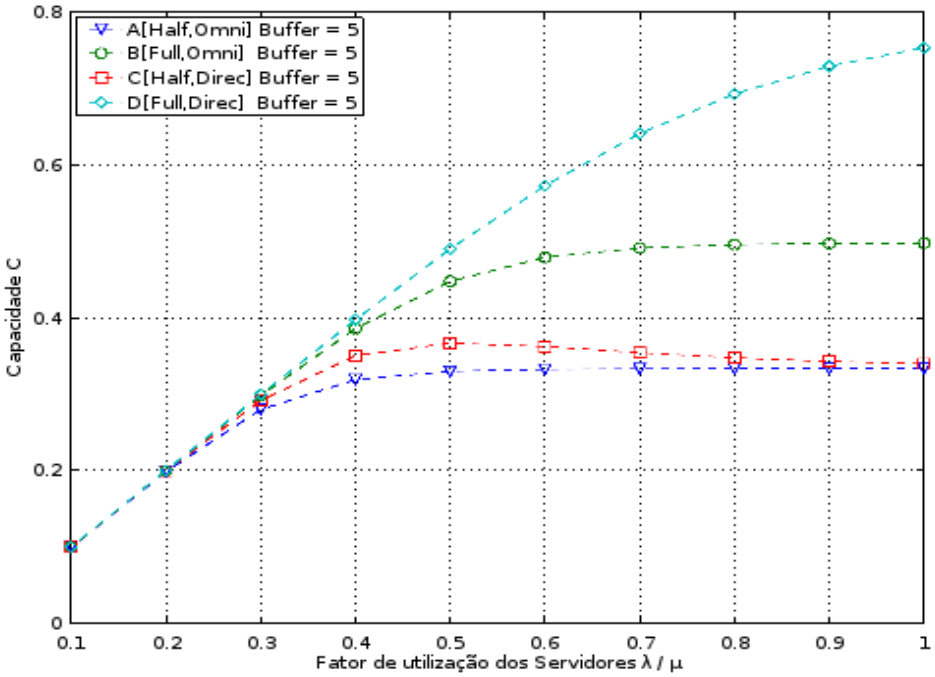

Figura 42: Capacidade do sistema / μ, buffer 5.

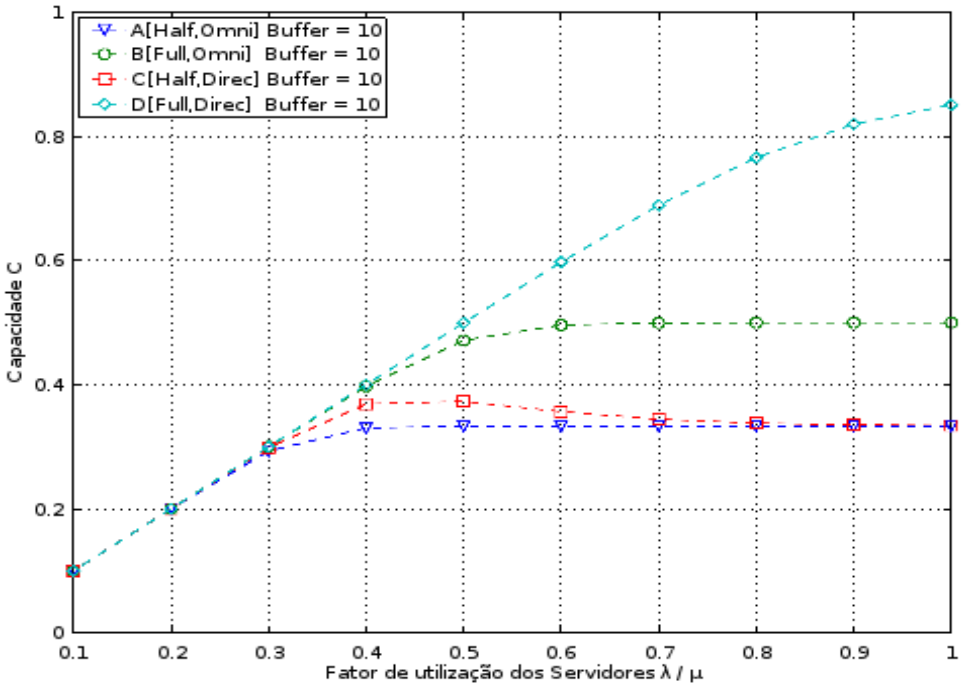

Figura 43: Capacidade do sistema / μ, buffer 10.

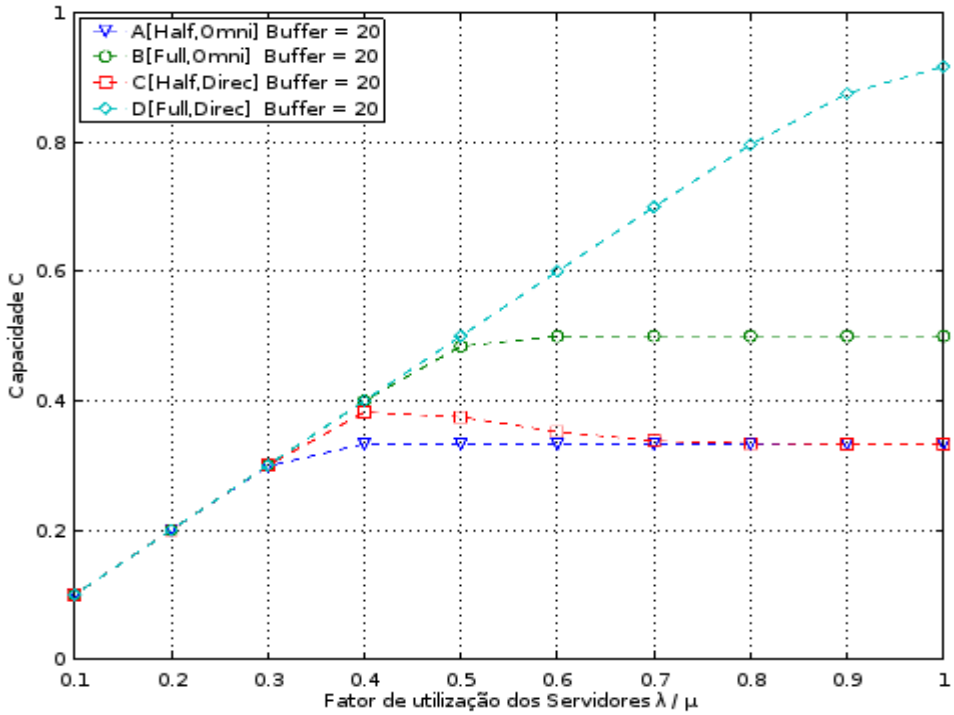

Figura 44: Capacidade do sistema / μ, buffer 20.

D) Vazão

A vazão, *Th*, continua a ser calculada da mesma maneira que no modelo sem *buffer*, ou seja:

$$Th = \frac{C}{\lambda} \tag{12}$$

Onde *C* é a taxa média de transmissões efetuadas com sucesso e λ a taxa total de chegadas no sistema.

Na Figura 45 observa-se que a vazão do modo A[Half,Omni] aumenta com o aumento do *buffer* de b=1 até b=5, mas se mantém praticamente inalterada, para b≥5 quando ρ≥0.5. Quando o ρ tende a 1, a vazão tende para 1/3 como mostrado no artigo [13].

Na Figura 46 observa-se que a vazão do modo B[Full,Omni] aumenta com o aumento do *buffer* de b=1 até b=5, mas se mantém praticamente inalterada, para b≥5 quando ρ≥0.7. Quando o ρ tende a 1, a vazão tende para ½ como mostrado no artigo [13].

Na Figura 47 observa-se que a vazão do modo C[Half,Direc] aumenta com o aumento do *buffer* para ρ≤0.5. Para ρ>0.5 e b≥5 a vazão diminui com o aumento do *buffer.* Quando o ρ tende a 1, a vazão tende para 1/3.

Na Figura 48 observa-se que a vazão do modo D[Full,Direc] aumenta com o aumento do *buffer.*

Nas Figuras 49, 50, 51 e 52, observa-se que os modos que utilizam transmissão *Full Duplex* têm uma vazão muito superior aos modos que utilizam transmissão *Half Duplex.*

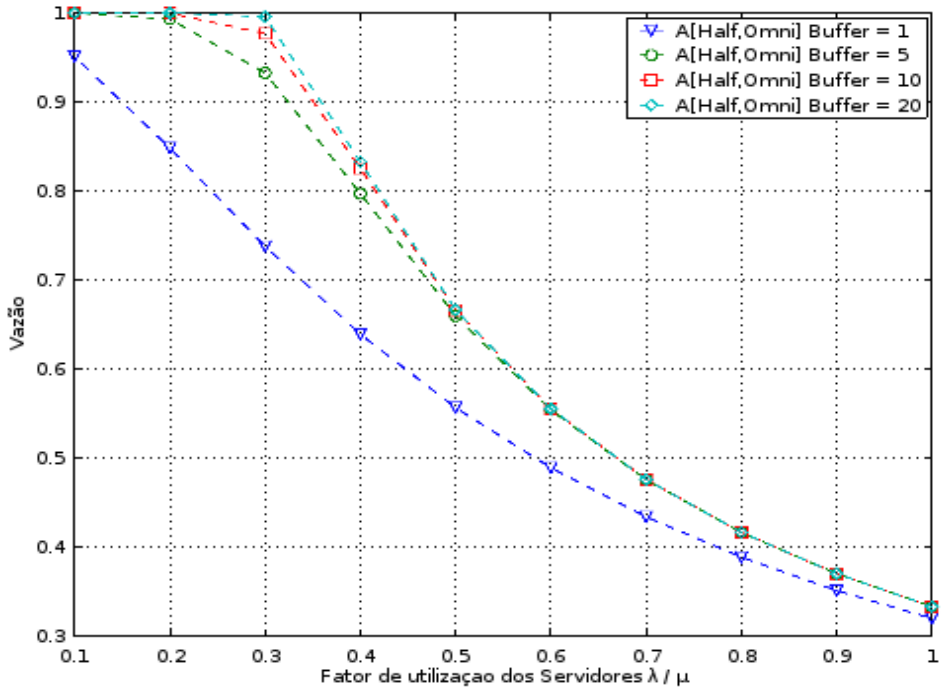

Figura 45: Modo A[Half,Omni] Vazão.

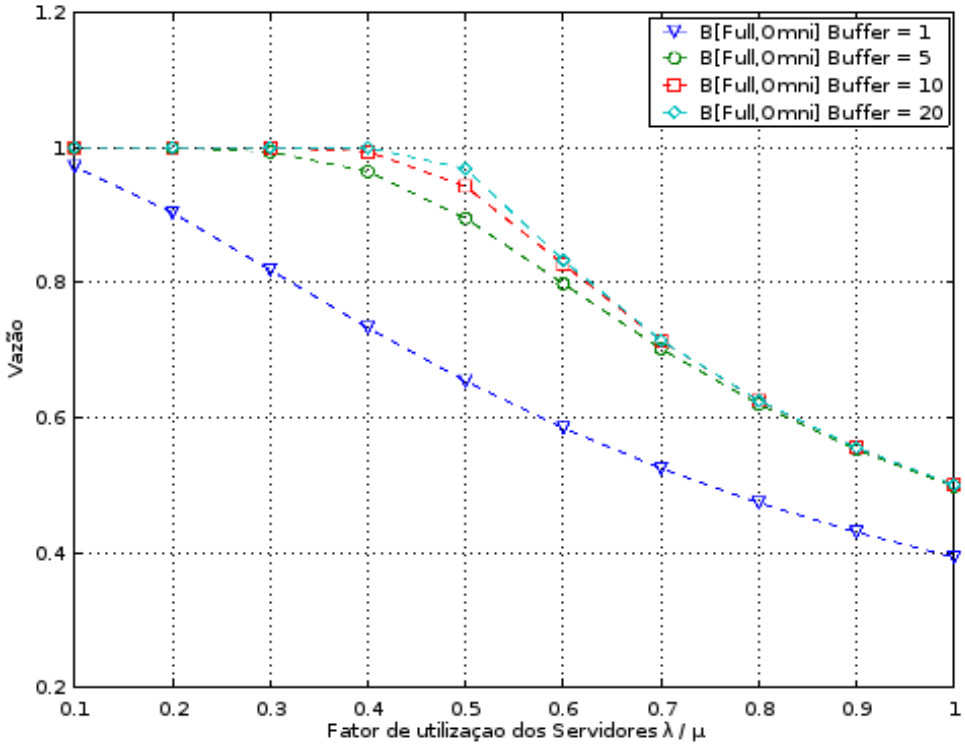

Figura 46: Modo B[Full,Omni] Vazão.

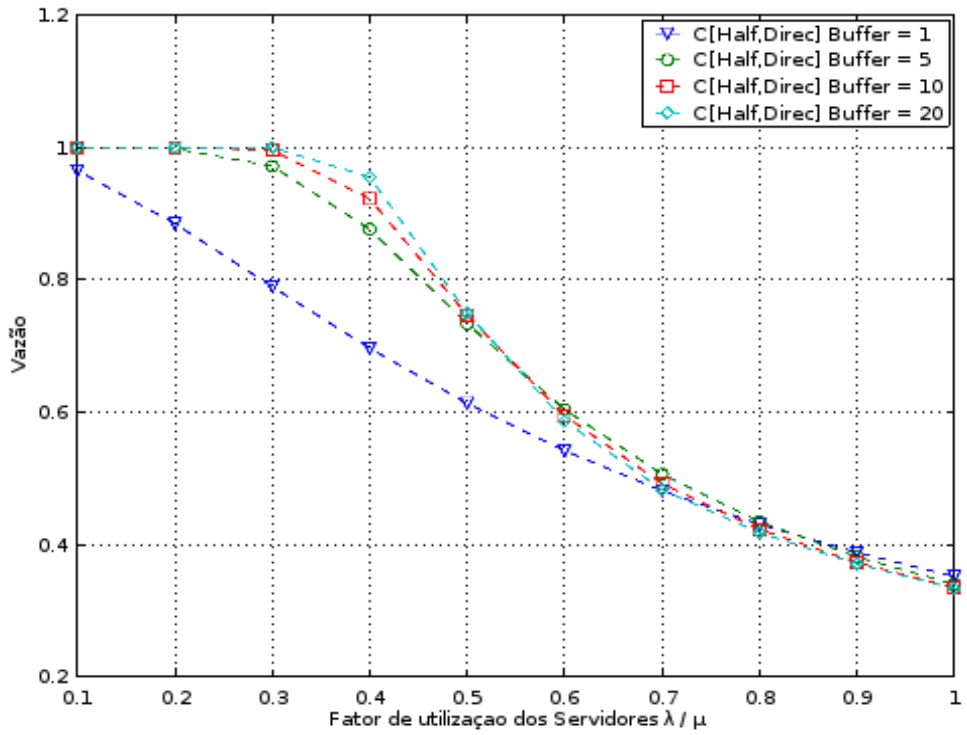

Figura 47: Modo C[Half,Direc] Vazão.

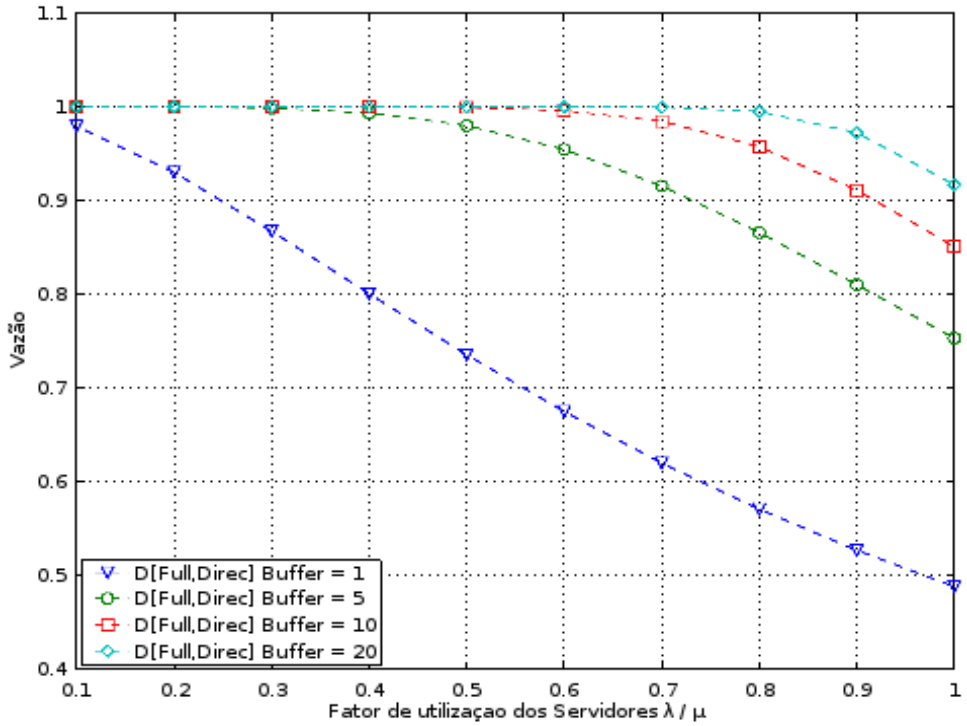

Figura 48: Modo D[Full,Direc] Vazão.

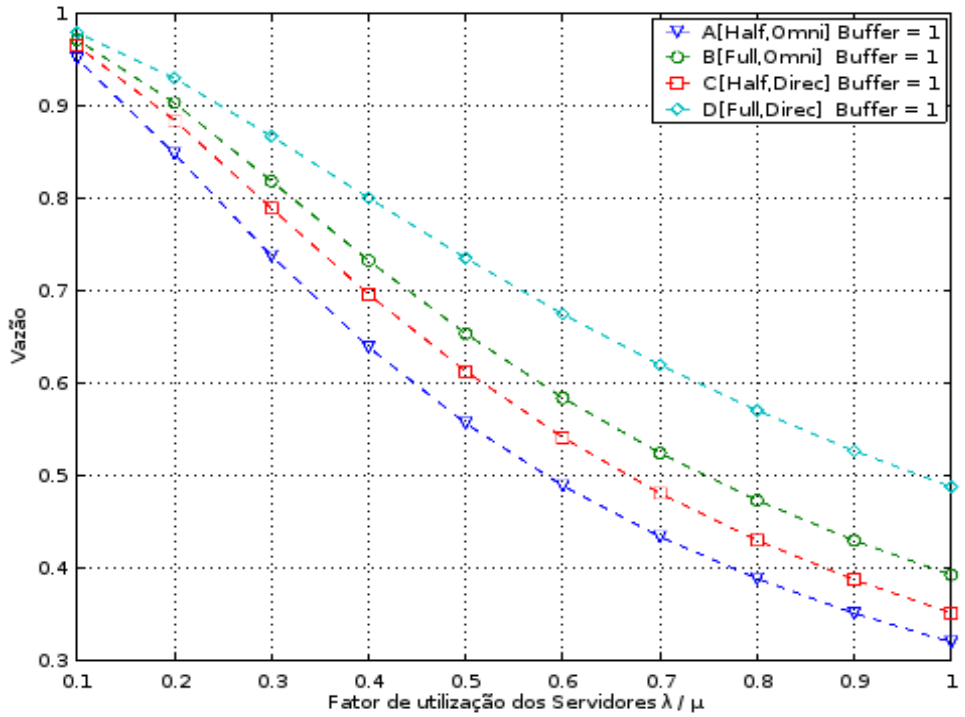

Figura 49: Vazão, buffer 1.

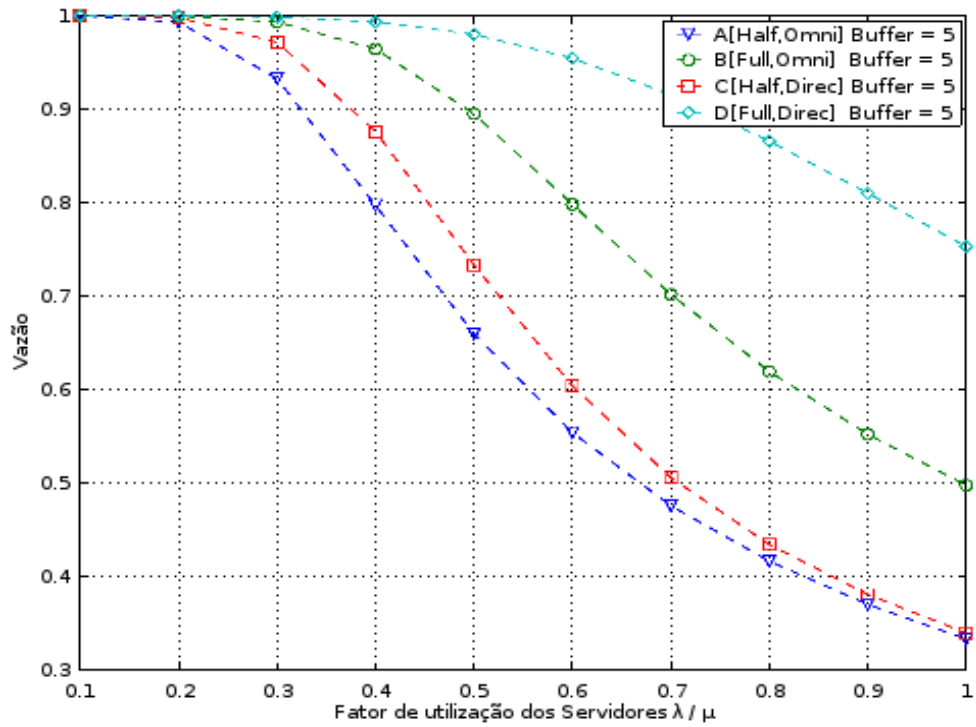

Figura 50: Vazão, buffer 5.

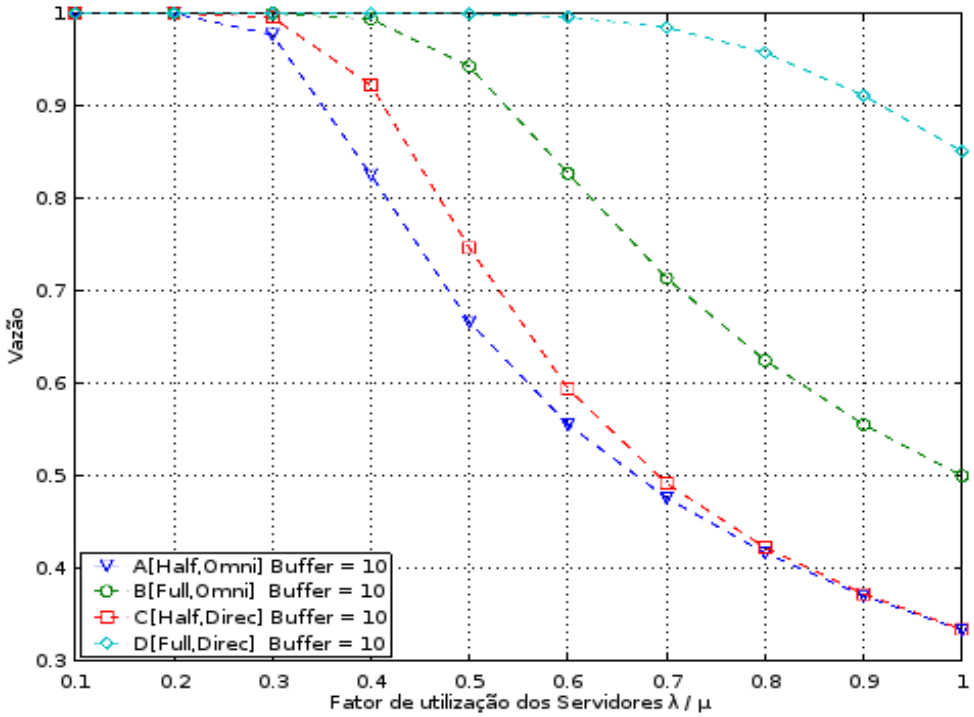

Figura 51: Vazão, buffer 10.

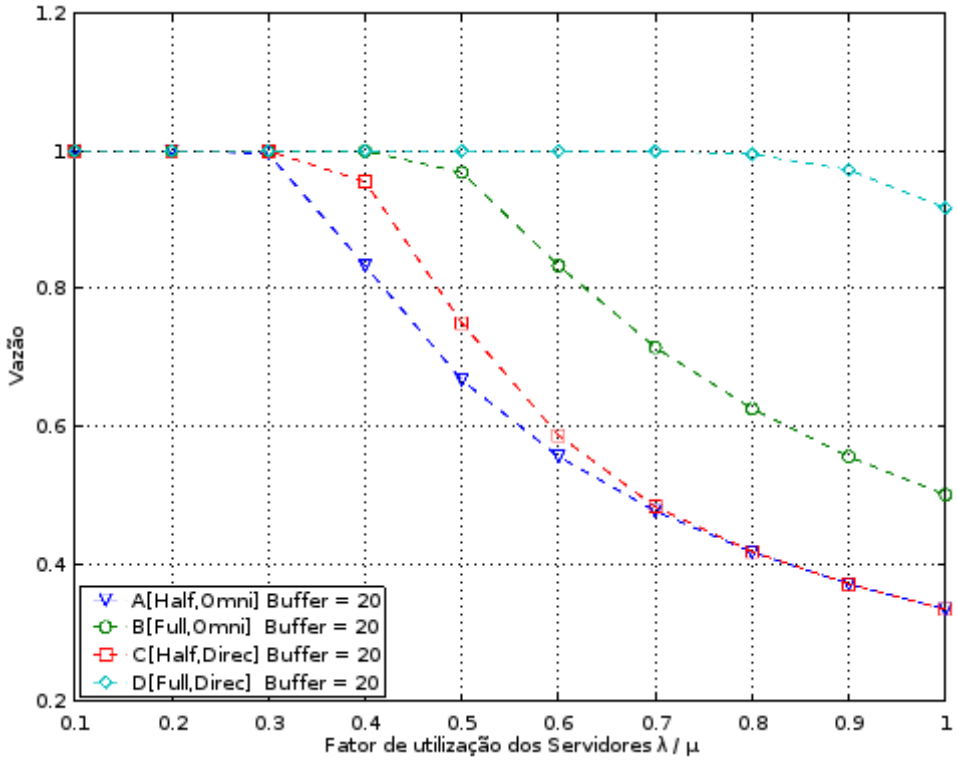

Figura 52: Vazão, buffer 20.

E) Número Médio de Elementos no Sistema

O número médio de elementos no sistema, *Eq*, continua a ser calculado da mesma maneira que no modelo sem *buffer*, ou seja:

$$E_q = \sum_{x \in S} \pi(x) N(x) \tag{13}$$

Onde π(x) representa a probabilidade do estado *x* da cadeia e N(x) o somatório de todos os pacotes neste estado, ou seja, N(x)=i+wi+j+wj+k+wk.

Nas Figura 53 a 56 observa-se que o número médio de elementos no sistema aumenta com o aumento do *buffer,* como esperado.

Nas Figuras 57, 58, 59 e 60, observa-se que para ρ>0.9 o modo B[Full,Omni] tem um maior número de elementos no sistema, nesse modo três servidores utilizam *buffer* e apenas dois podem transmitir em simultâneo. Em seguida vem o modo C[Half,Direc] onde dois servidores utilizam *buffer* e apenas dois podem transmitir em simultâneo. Depois vem o modo D[Full,Direc] onde todos os servidores utilizam *buffer* e todos podem transmitir em simultâneo. Por fim o modo A[Half,Omni] onde apenas um servidor utiliza *buffer* e apenas um servidor pode transmitir por vez.

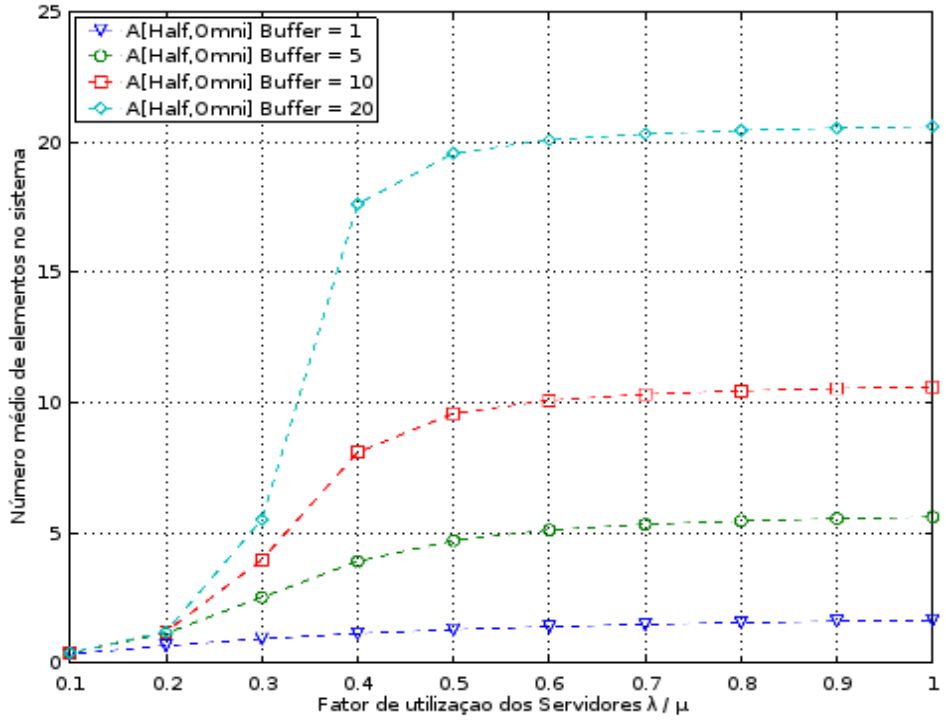

Figura 53: Modo A[Half,Omni] número médio de elementos no sistema.

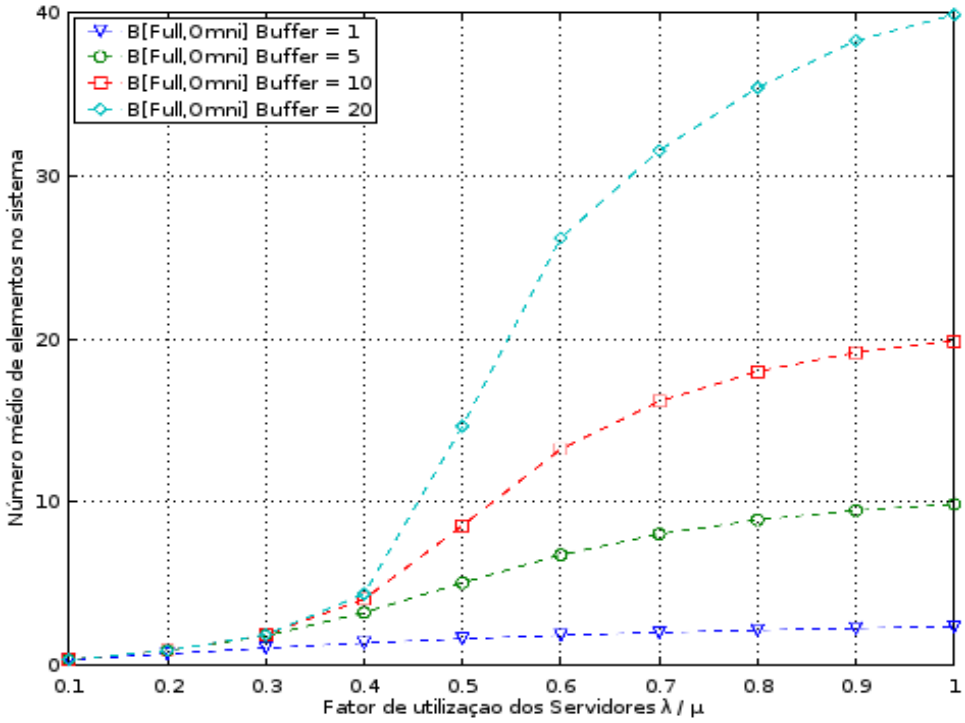

Figura 54: Modo B[Full,Omni] número médio de elementos no sistema.

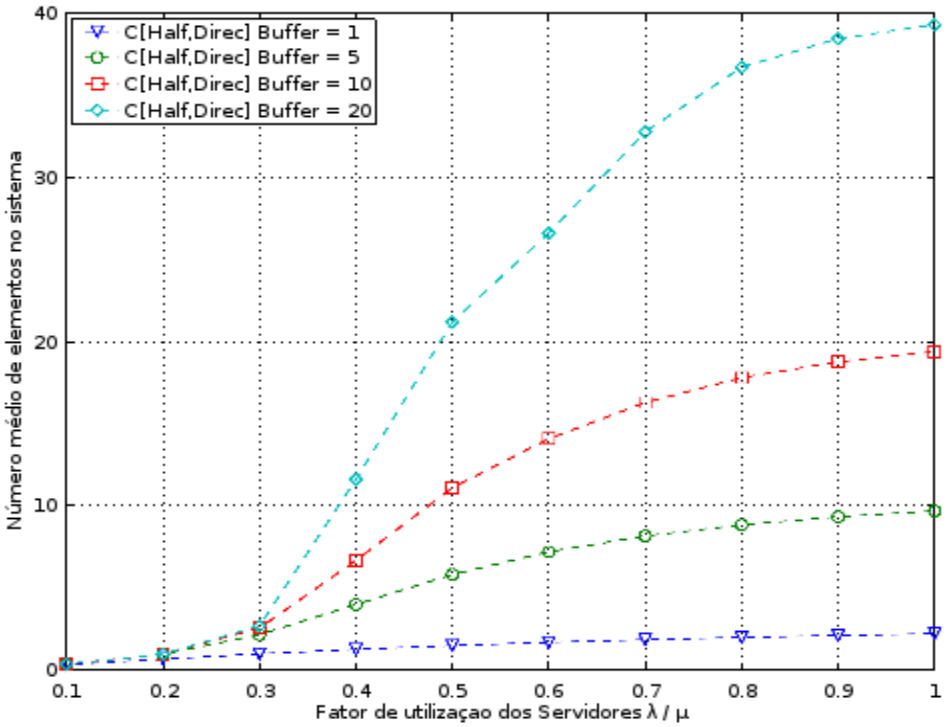

Figura 55: Modo C[Half,Direc] número médio de elementos no sistema.

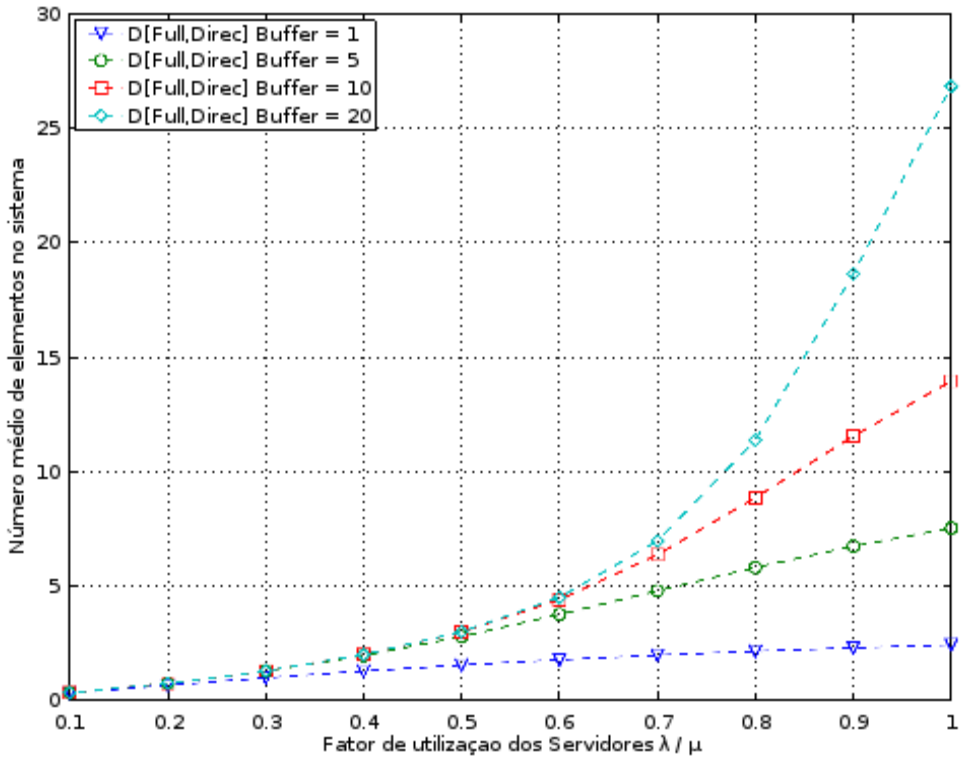

Figura 56: Modo D[Full,Direc] número médio de elementos no sistema.

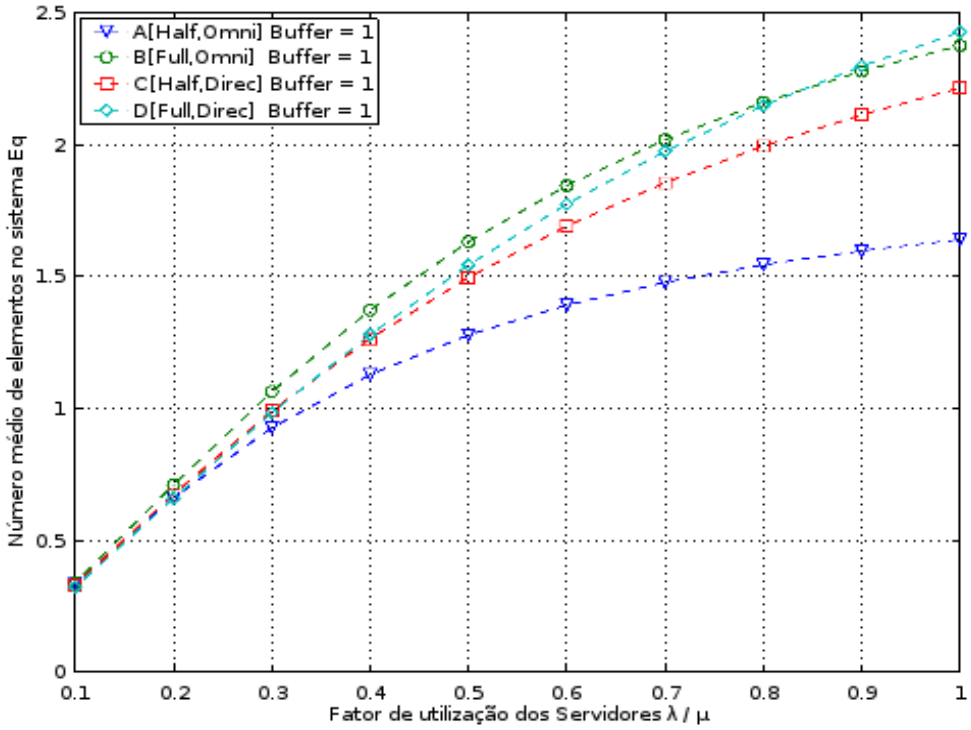

Figura 57: Número médio de elementos no sistema, buffer 1.

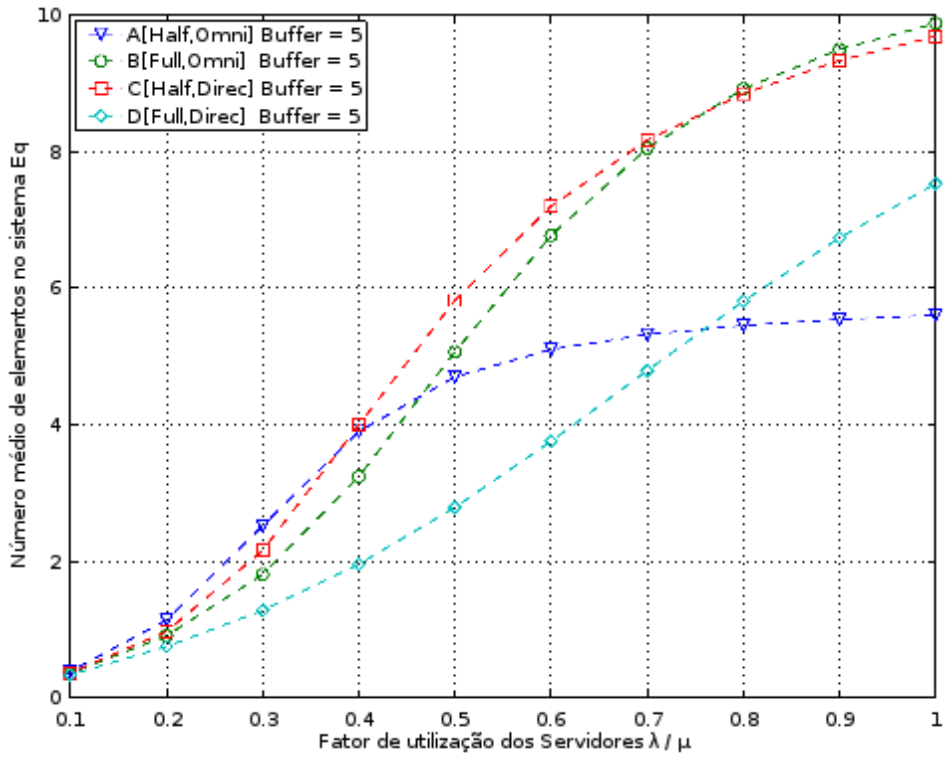

Figura 58: Número médio de elementos no sistema, buffer 5.

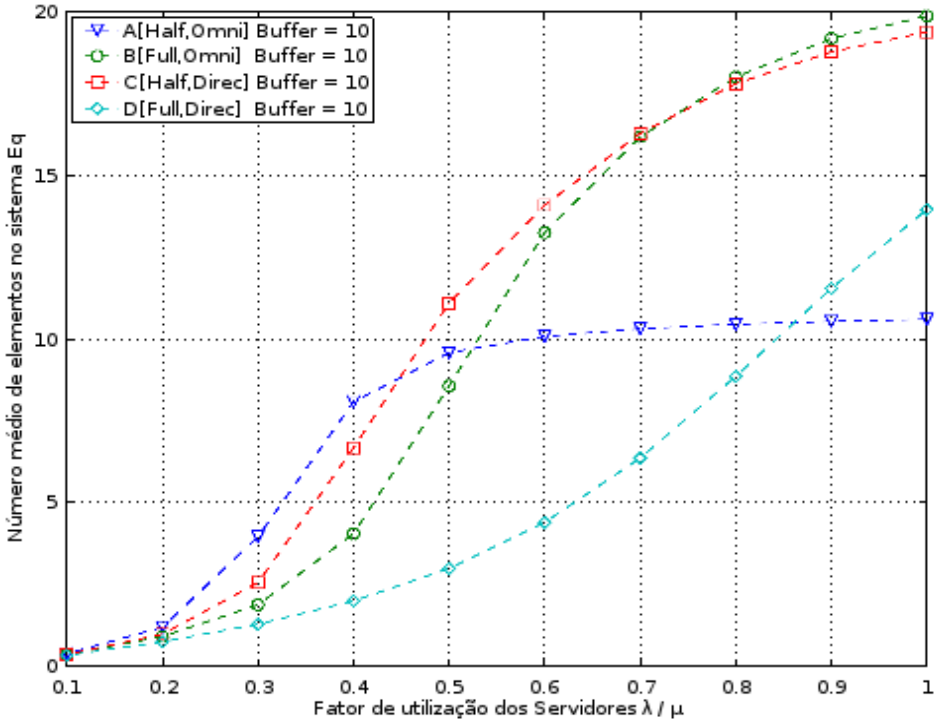

Figura 59: Número médio de elementos no sistema, buffer 10.

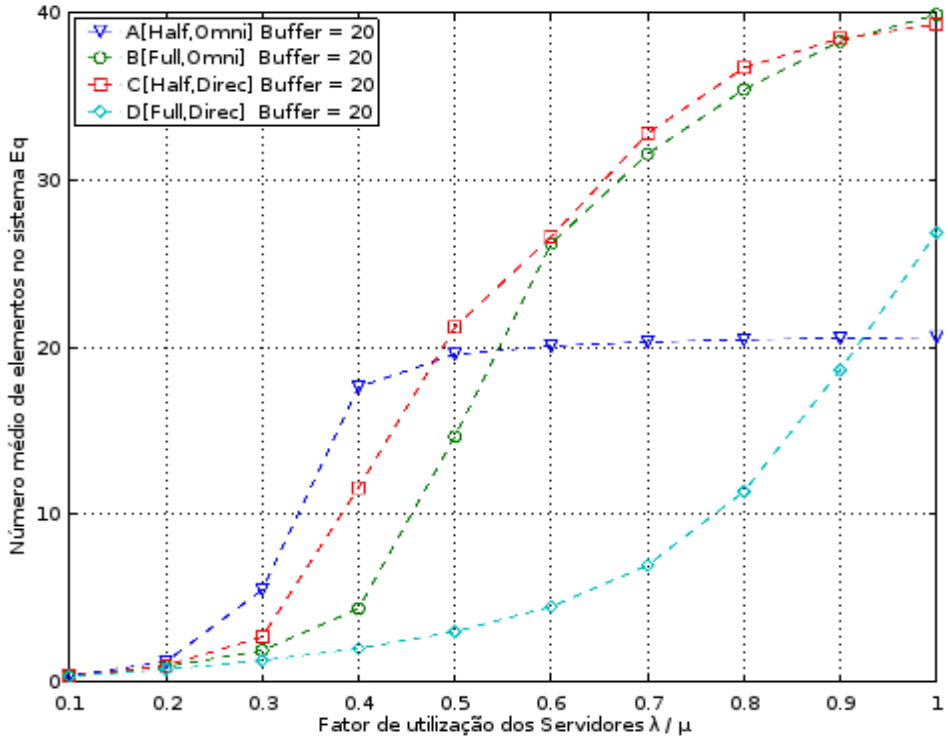

Figura 60: Número médio de elementos no sistema, buffer 20.

3.8- Conclusões do Capítulo

Neste capítulo apresentou-se a análise de desempenho dos modos de operação A[Half,Omni], B[Full,Omni], C[Half,Direc] e D[Full,Direc] numa rede *wireles multi-hop* em linha com tráfego em apenas um sentido, e analisou-se as seguintes métricas de desempenho: probabilidade de bloqueio, capacidade do sistema, probabilidade de descarte, vazão e número médio de elementos no sistema.

Primeiramente, analisou-se um cenário onde os servidores não possuíam *buffer*, e observou-se que a probabilidade de descarte dos modos que utilizam a tecnologia *full duplex*, B[Full,Omni] e D[Full,Direc], era superior à dos modos *half duplex*, A[Half,Omni] e C[Half,Direc], isso porque à tecnologia *full duplex* permite o envio e recepção simultaneamente de pacotes. No entanto, como não existe *buffer* nos servidores, quando há uma recepção no servidor, enquanto o mesmo servidor está a transmitir, o pacote recebido é descartado, e isso afetou negativamente a capacidade e vazão desses modos. Assim, o modo com melhor desempenho nesse cenário, em termos de capacidade e vazão, é o modo C[Half,Direc].

Num segundo momento, incluiu-se *buffer* nos servidores. O tamanho do *buffer* é o mesmo para todos os servidores. Com a inclusão do *buffer,* verificou-se uma melhoria de desempenho muito baixa nos modos com tecnologia de transmissão *half duplex*, chegando mesmo a ser prejudicial para o modo C[Half,Omni]. Já nos modos com a tecnologia de transmissão *full duplex, a* inclusão do *buffer* reduziu significativamente as probabilidades de descarte e de bloqueio, melhorando o desempenho desses modos em termos de capacidade e vazão, superando os modos com a tecnologia *half duplex*. Neste cenário, o modo com melhor desempenho é o modo D[Full,Direc], chegando a uma vazão quase três vezes superior aos modos A[Half,Omni] e C[Half,Direc], e quase duas vezes superior ao modo B[Full,Omni].

Capítulo 4 - Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste trabalho desenvolveu-se 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* com tráfego em apenas um sentido.

Concluiu-se que, para um cenário sem *buffer* nos nós da rede, a combinação de [Half,Direc] é a melhor combinação de tecnologias a serem adotadas para os nós da rede, em termos de capacidade e vazão. Viu-se também que neste cenário a tecnologia *full duplex* sofre com uma grande probabilidade de descarte de pacotes.

Todavia, quando inserimos *buffer* nos nós da rede, ocorre um aumento significativo do desempenho da tecnologia *full duplex* devido à diminuição da probabilidade de bloqueio e descarte, se refletindo em um aumento da capacidade e da vazão nos modos com transmissão *full duplex*. O modo B[Full,Omni] chega à vazão de ½ quando ρ tende a 1, como mostrado em [13], com apenas 5 posições de *buffer*. O modo D[Full,Direc] chega a uma vazão superior a 0,9 com 20 posições de *buffer* e continua a aumentar com o aumento do tamanho do *buffer*.

O modo A[Half,Omni], que utiliza a tecnologia *half duplex*, chega à vazão de 1/3 quando ρ tende a 1, como mostrado em [13], com apenas 5 posições de *buffer*. Já o modo C[Half,Direc] tem uma degradação da performance com a inserção do *buffer* e tende a uma vazão de 1/3 com mais de 10 posições de *buffer* quando ρ tende a 1.

No cenário com *buffer* nos nós da rede, a combinação D[Full,Direc] se destaca por ser a melhor combinação a ser adotada, chegando quase ao triplo da vazão das combinações A[Half,Omni] e C[Half,Direc], e quase ao dobro da vazão da combinação B[Full,Omni].

Pode-se concluir que a tecnologia de transmissão *full duplex* tem um desempenho muito superior à tecnologia *half duplex* no cenário com *buffer*.

4.1- Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros sugerem-se:

- Analisar o atraso dos referidos modos na rede em questão.
- Estender o modelo para uma rede com tráfego nos dois sentidos.
- Modelar o sistema considerando erros de transmissão.
- Considerar que a eliminação da Self-Interference não é perfeita.
- Modelar a situação em que a interferência do sinal de transmissão tem alcance de mais de um nó.
- Em [13], os autores propõem um protocolo MAC para a rede *multi-hop* apresentada neste estudo. Como trabalho futuro, sugere-se a modelagem desse protocolo.
- Estender o modelo para um número variável de nós na rede.

Anexo A. Calculo das Probabilidades em Regime Estacionário.

O calculo das probabilidades em regime estacionário foi implementado no MatLab da seguinte maneira:

Através das equações/padrões de transição geramos a Matriz de Estados ME (que representa o conjunto de estados possíveis S) e a Matriz de taxas de Transição MT (que representa todas as possíveis transições entre estados) e a partir da ME e da MT calculamos as probabilidades em regime estacionário.

Para cada um dos modos de operação criamos um ficheiro no MatLab para conter a sua programação específica, e a programação genérica foi colada em outros ficheiros.

Modelo sem Buffer

cenarioA.m

```
1  %Calculo da Matriz de estados ME.
2  %Calculo da Matriz de taxas de transicoes MT.
3  %Calculo de interesse CAI.
4  function a = cenarioA(ld,mi)
5  tb = 0;
6  [eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
7  [ME,MT] = transicoes(tb,1,eqT,cd);
8  a = CAI(ME,MT,ld,mi,tb,1);
9  end
10
11 function [e,c] = equacoesT(ld,mi)
12 i=0;bi=0;j=0;bj=0;k=0;bk=0;
13
14 %Equacoes/padroes de Transicoes
15 e =[ i+1,bi,j,bj,k,bk,ld;      %1
16      i,bi+1,j,bj,k,bk,ld;      %2
17      i,bi+1,j,bj,k,bk,ld;      %3
18      i-1,bi,j+1,bj,k,bk,mi;    %4
19      i,bi,j-1,bj,k+1,bk,mi;    %5
20      i,bi,j,bj,k-1,bk,mi;      %6
21      i+1,bi-1,j,bj,k-1,bk,mi];%7
22 %Condicoes das equacoes/padroes de Transicoes
23 %0=0; 1=1; 4=nao vazio; 5=cheio; 6=nao cheio; 9=tanto faz.
24   c =[0,0,0,0,0,0;  %1
25       0,0,1,0,0,0;  %2
26       0,0,0,0,1,0;  %3
27       1,0,0,0,0,0;  %4
28       0,9,1,0,0,0;  %5
29       0,0,0,0,1,0;  %6
30       0,1,0,0,1,0]; %7
31 end
```

Figura 1: Ficheiro do MatLab, Modo A sem buffer.

cenarioB.m

```
%Calculo da Matriz de estados ME.
%Calculo da Matriz de taxas de transicoes MT.
%Calculo de interesse CAI.
function b = cenarioB(ld,mi)
tb = 0;
[eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
[ME,MT] = transicoes(tb,1,eqT,cd);
b = CAI(ME,MT,ld,mi,tb,1);
end

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

%Equacoes/padroes 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,bj,k-1,bk,mi;            %5
     i,bi,j-1,bj,k,bk+1,mi;          %6
     i-1,bi,j,bj,k,bk,mi;            %7
     i+1,bi-1,j,bj,k-1,bk,mi;        %8
     i-1,bi,j+1,bj,k+1,bk-1,mi;      %9
     i,bi,j-1,bj,k,bk,mi];           %10
%Condicoes das equacoes/padroes de Transicoes
%0=0; 1=1; 4=nao vazio; 5=cheio; 6=nao cheio; 9=tanto faz.
  c =[0,0,9,0,0,0;
      0,0,9,0,1,0;
      1,0,0,0,0,0;
      0,0,1,0,0,0;
      0,0,9,0,1,0;
      1,0,1,0,0,0;
      1,0,1,0,0,0;
      0,1,9,0,1,0;
      1,0,0,0,0,1;
      0,9,1,0,1,0];

end
```

Figura 2: Ficheiro do MatLab, Modo B sem buffer

cenarioC.m

```
%Calculo da Matriz de estados ME.
%Calculo da Matriz de taxas de transicoes MT.
%Calculo de interesse CAI.
function c = cenarioC(ld,mi)
tb = 0;
[eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
[ME,MT] = transicoes(tb,1,eqT,cd);
c = CAI(ME,MT,ld,mi,tb,1);%Calculos de interesse
end

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

%Equacoes/padroes 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,mi;        %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,mi;        %13
     i-1,bi,j+1,bj-1,k,bk,mi];   %14
%Condicoes das equacoes/padroes 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
      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
```

Figura 3: Ficheiro do MatLab, Modo C sem buffer

CAI.m

```
%Calculos de Interesse:
%Probabilidade de Bloqueio pB;
%Capacidade cp;
%Probabilidade de Descarte pD;
%Numero medio de elementos Eq;
%Vazao
function cai = CAI(ME,MT,ld,mi,tb,modo)

Mpb = matrizProb(ME,MT);
numE = size(ME); numE = numE(1);
cp = 0;
pB = 0;
Eq = 0;

for i=1:numE
    pB = pB + ME(i,1) * Mpb(i);
    pB = pB + ME(i,2) * Mpb(i);
    cp = cp + ( ME(i,5) * Mpb(i) * mi );
    Eq = Eq + (sum(ME(i,:) * Mpb(i)));
end

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

caiLegenda = ['     pB    ','     pD     ','     cp     ','     vazao     '];
cai = [pB,pD,cp,vazao,Eq];


end

```

Figura 4: Ficheiro do MatLab, CAI sem buffer.

transicoes.m

```
%Calculo da Matriz de Estados ME;
%Calculo da Matriz de Taxas de Transicao MT;
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 %Para todas as equacoes/padroes de transicao
            if precedente( ME(estado,:),cd(i,:),tB)%se o estado cumpre com a condicao
                std = ME(estado,:)+eqT(i,1:end-1);% aplica a equacao/padrao de transicao
                    if novoEstado(ME,std);%se for um estado novo
                        ME=[ME;std];%adiciona a matriz de estados
                    end
                    indiceEstado = encontraEstado(ME,std);%descobre queal o numero do estado destino
                    MT(estado,indiceEstado)=eqT(i,end);%insere a transicao na matriz de transicao
            end
        end
        numStd=size(ME);numStd=numStd(1);
        if estado < numStd %se nao e o ultimo estado da matriz de estados
            estado=estado+1;%vai para o proximo estado
        else
            estado = 0;
        end
    end
    me = ME;
    mt = MT;
end
```

Figura 5: Ficheiro do MatLab, transições sem buffer.

encontraEstado.m

```
%Retorna o numero de um estado da matriz de estados
function e = encontraEstado(ME,std)
numE=size(ME);numE=numE(1);
for i=1:numE
    if ME(i,:)==std
        e=i;
    end
end
end
```

Figura 6: Ficheiro do MatLab, encontra estado sem buffer.

novoEstado.m

```
%Verifica se o estado ainda nao existe 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
```

Figura 7: Ficheiro do MatLab, novo estado sem buffer.

precedente.m

```
%Testa se o estado cumpre com as condicoes da equacao/padrao de transicao
function p = precedente(std,cd,tB)
p=1;

for i=1:6
    if cd(i)==0 %igual a 0
        if std(i)~=0
            p=0;
        end
    else
        if cd(i)==1 %igual a 1
            if std(i)~=1
                p=0;
            end
        else
            if cd(i)==4 % >0  not empty
                if std(i) <= 0
                    p=0;
                end
            else
                if cd(i)==5 % Full
                    if std(i) ~= tB
                        p=0;
                    end
                else
                    if cd(i)==6 %Not Full
                        if std(i) == tB
                            p=0;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
```

Figura 8: Ficheiro do MatLab, Precedente sem buffer

matrizProb.m

```
%Calculo da Matriz de probabilidade em regime estacionario pb
function pb = matrizProb(ME,MT)

    numE = size(ME);numE = numE(1);
    %Adicionar o somatorio negativo as linhas da diagonal principal
    for i=1:numE
        MT(i,i) = - sum(MT(i,:));
    end
    %Matriz transposta (matriz dos coeficientes das equacoes de balanco geral).
    MT = MT.';
    %Adicionar a linha de 1s no final da matriz (equacao de equilibrio)
    MT = [MT;ones(1,numE)];
    %Matriz das costantes
    B(numE+1,1) = 1;
    %Probabilidades dos estados
    pb = MT\B;

end
```

Figura 9: Ficheiro do MatLab, probabilidades sem buffer

Modelo com Buffer

cenarioA.m

```
1  %Calculo da Matriz de estados ME.
2  %Calculo da Matriz de taxas de transicoes MT.
3  %Calculo de interesse CAI.
4  function a = cenarioA(ld,mi,tb)
5
6  [eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
7  [ME,MT] = transicoes(tb,1,eqT,cd);
8  a = CAI(ME,MT,ld,mi,tb,1);
9  end
10
11
12 function [e,c] = equacoesT(ld,mi)
13 i=0;bi=0;j=0;bj=0;k=0;bk=0;
14 %Equacoes/padroes de Transicoes
15 e =[ i+1,bi,j,bj,k,bk,ld;       % 1
16      i,bi+1,j,bj,k,bk,ld;       % 2
17      i,bi+1,j,bj,k,bk,ld;       % 3
18      i,bi+1,j,bj,k,bk,ld;       % 4
19      i-1,bi,j+1,bj,k,bk,mi;     % 5
20      i,bi,j-1,bj,k+1,bk,mi;     % 6
21      i,bi,j,bj,k-1,bk,mi;       % 7
22      i+1,bi-1,j,bj,k-1,bk,mi]; % 8
23   %Condicoes das equacoes/padroes de Transicoes
24 %0=0; 1=1; 4=nao vazio; 5=cheio; 6=nao cheio; 9=tanto faz.
25   c =[0,0,0,0,0,0; % 1
26       1,6,0,0,0,0; % 2
27       0,6,1,0,0,0; % 3
28       0,6,0,0,1,0; % 4
29       1,9,0,0,0,0; % 5
30       0,9,1,0,0,0; % 6
31       0,0,0,0,1,0; % 7
32       0,4,0,0,1,0];% 8
33
34 end
```

Figura 10: Ficheiro do MatLab, Modo A com buffer.

cenarioB.m

```
1  %Calculo da Matriz de estados ME.
2  %Calculo da Matriz de taxas de transicoes MT.
3  %Calculo de interesse CAI.
4  function b = cenarioB(ld,mi,tb)
5
6  [eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
7  [ME,MT] = transicoes(tb,2,eqT,cd);
8  b = CAI(ME,MT,ld,mi,tb,2);
9  end
10
11 function [e,c] = equacoesT(ld,mi)
12 i=0;bi=0;j=0;bj=0;k=0;bk=0;
13 %Equacoes/padroes de Transicoes
14 e =[  i+1,bi,j,bj,k,bk,ld;     %1
15       i,bi+1,j,bj,k,bk,ld;     %2
16       i,bi+1,j,bj,k,bk,ld;     %3
17       i-1,bi,j+1,bj,k,bk,mi;   %4
18       i,bi-1,j+1,bj,k,bk,mi;   %5
19       i,bi,j-1,bj,k+1,bk,mi;   %6
20       i-1,bi,j,bj+1,k,bk,mi;   %7
21       i,bi,j-1,bj,k,bk+1,mi;   %8
22       i,bi,j-1,bj,k,bk+1,mi;   %9
```

Figura 11: Ficheiro do MatLab, Modo B com buffer parte 1.

cenarioB.m

```
23          i,bi,j,bj,k-1,bk,mi;     %10
24          i,bi-1,j,bj+1,k,bk,mi;   %11
25          i,bi,j,bj-1,k+1,bk,mi;   %12
26          i+1,bi-1,j,bj,k-1,bk,mi;%13
27          i-1,bi,j,bj,k,bk,mi;     %14
28          i,bi,j,bj-1,k,bk+1,mi;   %15
29          i,bi,j,bj-1,k,bk+1,mi;   %16
30          i-1,bi,j+1,bj,k+1,bk-1,mi;%17
31          i,bi-1,j,bj,k,bk,mi;     %18
32          i-1,bi,j,bj+1,k+1,bk-1,mi;%19
33          i,bi,j-1,bj,k,bk,mi;     %20
34          i,bi,j-1,bj,k,bk,mi;     %21
35          i,bi,j,bj,k,bk-1,mi;     %22
36          i-1,bi,j,bj,k+1,bk-1,mi;%23
37          i,bi,j,bj-1,k,bk,mi;     %24
38          i,bi,j,bj-1,k,bk,mi;];   %25
39  %Condicoes das equacoes/padroes de Transicoes
40  %0=0; 1=1; 4=nao vazio; 5=cheio; 6=nao cheio; 9=tanto faz.
41      c =[0,0,9,9,0,0; %1
42          1,6,9,9,0,9; %2
43          0,6,9,9,1,9; %3
44          1,0,0,0,0,0; %4
45          1,4,0,0,0,0; %5
46          0,0,1,0,0,0; %6
47          1,0,1,6,0,0; %7
48          1,9,1,0,0,6; %8
49          0,9,1,0,1,6; %9
50          0,0,9,9,1,0; %10
51          1,4,1,6,0,0; %11
52          0,0,1,4,0,0; %12
53          0,4,9,9,1,9; %13
54          1,0,1,5,0,0; %14
55          1,9,1,4,0,6; %15
56          0,9,1,4,1,6; %16
57          1,9,0,0,0,4; %17
58          1,4,1,5,0,0; %18
59          1,9,1,6,0,4; %19
60          1,9,1,0,0,5; %20
61          0,9,1,0,1,5; %21
62          0,0,9,9,1,4; %22
63          1,9,1,5,0,4; %23
64          0,9,1,4,1,5; %24
65          1,9,1,4,0,5;]; %25
66  end
```

Figura 12: Ficheiro do MatLab, Modo B com buffer parte 2.

cenarioC.m

```
%Calculo da Matriz de estados ME.
%Calculo da Matriz de taxas de transicoes MT.
%Calculo de interesse CAI.
function c = cenarioC(ld,mi,tb)

[eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
[ME,MT] = transicoes(tb,3,eqT,cd);
c = CAI(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;

%Equacoes/padroes 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,mi;          %9
      i-1,bi,j,bj+1,k,bk,mi;        %10
      i,bi-1,j,bj+1,k,bk,mi;        %11
      i,bi,j+1,bj-1,k-1,bk,mi;      %12
      i-1,bi,j,bj,k,bk,mi;          %13
      i,bi-1,j,bj,k,bk,mi];         %14
 %Condicoes das equacoes/padroes 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
      9,9,0,0,1,0; %8
      1,9,0,4,1,0; %9
      1,0,0,6,1,0; %10
      1,4,0,6,1,0; %11
      0,0,0,4,1,0; %12
      1,0,0,5,1,0; %13
      1,4,0,5,1,0];%14
end
```

Figura 13: Ficheiro do MatLab, Modo C com buffer.

cenarioD.m

```
%Calculo da Matriz de estados ME.
%Calculo da Matriz de taxas de transicoes MT.
%Calculo de interesse CAI.
function d = cenarioD(ld,mi,tB)
[eqT,cd] = equacoesT(ld,mi);
[ME,MT] = transicoes(tB,4,eqT,cd);
d = CAI(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;
%Equacoes/padroes 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-1,bi,j,bj+1,k,bk,mi;   %5
       i,bi,j,bj,k-1,bk,mi;     %6
       i,bi-1,j,bj+1,k,bk,mi;   %7
       i,bi,j,bj-1,k+1,bk,mi;   %8
       i-1,bi,j,bj,k,bk,mi;     %9
       i,bi-1,j+1,bj,k,bk,mi;   %10
       i,bi,j-1,bj,k,bk+1,mi;   %11
       i,bi-1,j,bj,k,bk,mi;     %12
       i,bi,j,bj,k,bk-1,mi;     %13
       i,bi,j,bj-1,k,bk+1,mi;   %14
       i,bi,j-1,bj,k,bk,mi;     %15
       i,bi,j,bj-1,k,bk,mi];    %16
 %Condicoes das equacoes/padroes 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
       1,0,1,6,9,9; %5
       9,9,9,9,1,0; %6
       1,4,1,6,9,9; %7
       9,9,1,4,0,0; %8
       1,0,1,5,9,9; %9
       1,4,0,0,9,9; %10
       9,9,1,0,1,6; %11
       1,4,1,5,9,9; %12
       9,9,9,9,1,4; %13
       9,9,1,4,1,6; %14
       9,9,1,0,1,5; %15
       9,9,1,4,1,5];%16
end
```

Figura 14: Ficheiro do MatLab, Modo D com buffer.

novoEstado.m

```
%procura o estado (std) na matriz de estados (ME).
%retorna 0 se nao o encontra.
%retorna o seu numero caso o encontre.
function n = novoEstado(ME,std,numEstados)
n=0;
nE = numEstados;
    for i=1:nE
        if ME(i,:) == std
            n=i;
            break;
        end
    end
end
```

Figura 15: Ficheiro do MatLab, novo estado com buffer.

CAI.m

```
%Calculos de Interesse:
%Probabilidade de Bloqueio pB;
%Capacidade cp;
%Probabilidade de Descarte pD;
%Numero medio de elementos Eq;
%Vazao
function cai = CAI(ME,MT,ld,mi,tb,modo)
Mpb = matrizProb(ME,MT);
numE = size(ME); numE = numE(1);

cp = 0;  pB = 0; Eq = 0;
for i=1:numE
    cp = cp + ( ME(i,5) * Mpb(i) * mi );

    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;

cai1 = ['pB   ','    pD     ',' cp    ','    vazao    ','    Eq    '];
cai = [pB,pD,cp,vazao,Eq];


end
```

Figura 16: Ficheiro do MatLab, CAI com buffer.

transicoes.m

```
%Calculo da Matriz de Estados ME;
%Calculo da Matriz de Taxas de Transicao MT;
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 %Para todas as equacoes/padroes de transicao
            if precedente( ME(estado,:),cd(i,:),tB)%se o estado cumpre com a condicao
                std = ME(estado,:)+eqT(i,1:end-1);% aplica a equacao/padrao de transicao
                estadoDestino = novoEstado(ME,std,numEstados);%descobre queal o numero do estado destino
                    if estadoDestino == 0 %se for um estado novo
                        ME=[ME;std]; %adiciona a matriz de estados
                        numEstados = numEstados +1; %Incrementa o numero de estados
                        MT(estado,numEstados)=eqT(i,end);%insere a transicao na matriz de transicao
                    else
                            MT(estado,estadoDestino)=eqT(i,end);
                    end
            end
        end

        if estado < numEstados %se nao e o ultimo estado da matriz de estados
            estado=estado+1; %vai para o proximo estado
        else
            estado = 0;
        end

    end

    me = ME;
    mt = MT;
end
```

Figura 17: Ficheiro do MatLab, transições com buffer.

Referências Bibliográficas

[1] Shanzhi Chen and Jian Zhao. The requirements, challenges, and technolo-gies for 5g of terrestrial mobile telecommunication. IEEE Communications Magazine, 52(5):36–43, 2014.

[2] Kenta Yamamoto, Yuya Saito, and Kenichi Higuchi. System-level throughput of non-orthogonal access with sic in cellular downlink when channel estimation error exists. In Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2014 IEEE 79th, pages 1–5. IEEE, 2014.

[3] 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.

[4] Mikko Heino et al. Recent advances in antenna design and interference cancellation algorithms for in-band full duplex relays. IEEE Communications Magazine, 53(5):91–101, 2015.

[5] NGMN Alliance. 5g white paper. Next generation mobile networks, white paper, pages 1–125, 2015.

[6] Leo Laughlin, Mark A Beach, Kevin A Morris, and John L Haine. Electrical balance duplexing for small form factor realization of in-band full duplex. IEEE Communications Magazine, 53(5):102–110, 2015.

[7] Karaputugala Madushan Thilina, Hina Tabassum, Ekram Hossain, and Dong In Kim. Medium access control design for full duplex wireless systems: challenges and approaches. IEEE Communications Magazine, 53(5):112–120, 2015.

[8] Muhammad Sohaib Amjad and Ozgur Gurbuz. Linear Digital Cancellation with Reduced Computational Complexity for Full-Duplex Radios. In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pages 1–6. IEEE, 2017.

[9] Elsayed Ahmed and Ahmed M Eltawil. All-digital self-interference cancellation technique for full-duplex systems. IEEE Transactions on Wireless Communications, 14(7):3519–3532, 2015.

[10] Xiaojing Huang and Y Jay Guo. Radio Frequency Self-Interference Cancellation With Analog Least Mean-Square Loop. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 65(9):3336– 3350, 2017.

[11] Min Soo Sim et al. Nonlinear self-interference cancellation for full-duplex radios: From link-level and system-level performance perspectives.IEEE Communications Magazine,55(9):158–167 2017.

[12] Ying Liu et al. A Full-Duplex Transceiver With Two-Stage Analog Cancellations for Multipath Self-Interference. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 65(12):5263–5273, 2017.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Melissa Duarte, Ashutosh Sabharwal, Vaneet 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.

[16] 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.

[17] Wenjie Zhou, Kannan Srinivasan, and Prasun Sinha. Rctc: Rapid concurrent transmission coordination in full duplex wireless networks. In Network Protocols (ICNP), 2013 21st IEEE International Conference on, pages 1–10. IEEE, 2013.

[18] 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.

[19] Torsten Braun, Andreas Kassler, 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] L. Kleinrock, Queueing systems, volume 1: Computer applications.
wiley New York, 1975.