

Construção de um Simulador de Redes ATM baseado em Redes de Petri

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação da Universidade Estadual de Campinas, como
parte dos requisitos exigidos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica

Tatiane Regina Bonfim

Graduada em Ciência da Computação pela Universidade Estadual de Maringá

Orientador:

Dr. Akebo Yamakami

Março de 2001

Banca Examinadora

Prof. Dr. Akebo Yamakami
FEEC/UNICAMP
Presidente

Prof. Dr. Shusaburo Motoyama
FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Ademir Aparecido Constantino
DIN/UEM – Universidade Estadual de
Maringá

Prof^a. Dra. Berenice Camargo Damaceno
CEETEPS/ Faculdade de Tecnologia de
Sorocaba
CEETEPS/ Faculdade de Engenharia de
Sorocaba

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B641c Bonfim, Tatiane Regina
Construção de um simulador de redes ATM baseado em redes de
petri / Tatiane Regina Bomfim.--Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Akebo Yamakami.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação.

1. Redes de computação – Simulação por computador. 2.
Comutação de pacotes (Transmissão de dados). 3. Redes de petri.
I. Yamakami, Akebo. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Agradecimentos

No decorrer destes dois anos de mestrado, muitas pessoas contribuíram para que eu alcançasse esse objetivo. Há muito a agradecer.

A Deus que, sem ele, eu não estaria aqui. Agradeço pelo ensinamento de vida, por ter aprendido a viver com felicidade, a lutar pelos meus ideais e, principalmente, por ter a certeza que ter fé é essencial em nossas vidas.

Ao Professor Akebo, pela paciência e disposição dedicada a mim. Tenho o maior orgulho de trabalhar com tão dedicado professor e orientador pelo grande profissional e ser humano que é. O Akebo é um exemplo de dedicação e competência.

Aos meus pais que sempre batalharam muito para que suas filhas pudessem ter uma boa formação. Agradeço por vocês serem um exemplo de força, garra e determinação.

A minha irmã Tânia, por ter despertado em mim o gosto pela pesquisa desde a graduação e o grupo PET.

A minha irmã Thátia pelo incentivo constante e pela demonstração de seriedade como pesquisadora.

Ao Robson, que sempre esteve presente nos momentos difíceis, disposto a me ajudar, a ouvir e consolar.

A professora Berenice e aos professores Ademir e Motoyama que compuseram a banca e que muito contribuíram para a melhoria deste trabalho.

As amigas de República, Silvia, Maria e Elizangela, que dividiram momentos de tristezas e de alegrias e que sempre tinham uma palavra amiga a dizer.

Aos amigos que fiz, Elaine, Reinaldo, Rodrigo, Andreza, Lais, Elder, Niudomar, Vinícius e Marco Antônio. Agradeço pela amizade e companheirismo.

Aos amigos de Maringá, Patrícia, Fernando, Will, Hélio, Humberto, Andreia, Juliana, pelos momentos de descontração e de bagunça em cada ida a Maringá.

Aos novos amigos Adriana, Regina, Aline, Dani, Eduardo, Allysson, Anibal, pela força na defesa.

A CAPES, pelo financiamento dos meus estudos durante o mestrado.

E a todos a quem possa ter esquecido. Um muito obrigado.

Resumo

Este trabalho tem o intuito de divulgar a construção de um simulador, responsável por avaliar o desempenho de Redes ATM. O simulador, que é composto por quatro módulos, foi proposto como uma forma de gerenciamento de tráfego, baseado no controle de admissão de conexões, e visa gerar estatísticas para avaliar o desempenho de redes ATM, segundo parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS) como atraso de conexões e perda de células durante sua transmissão. O primeiro módulo do simulador é responsável pela geração de conexões, utilizando-se o modelo de fontes ON-OFF. O segundo módulo compreende a própria rede física, composta por nós e enlaces, que é representada, modelada e implementada com o uso dos conceitos de Redes de Petri. O terceiro módulo é composto pela função CAC, responsável pela análise da rede, verificando a aceitação ou recusa de conexões. O último módulo compreende a geração das estatísticas dos parâmetros de QoS, como atraso de conexões e perda de células, necessários para a análise do desempenho da rede.

Abstract

This work addressed the construction of a simulator that has to evaluate the performance of ATM Nets. The simulator is composed of four modules and the traffic management is based in Connection Admission Control (CAC). The performance of ATM Nets is evaluated by using alike parameters of the quality of service (QoS) such as delay and cell loss. The first module generates connections by using On-Off sources. The second module comprises of a physical net, which is composed of nodes and arches. This module is represented, modeled, and implemented by using Petri Nets. The third module is composed of CAC functions, which examine the acceptance or refusal of the connections. The last module is a generator of the statistic of essential parameters (QoS), which are very important to analyze the net performance.

Índice

1. Introdução	1
2. Redes ATM	4
2.1. Conceito	4
2.2. Comutação de Pacotes	4
2.3. Célula ATM	5
2.4. Tráfego ATM	6
2.5. Controle de Tráfego	7
2.5.1. Controle de Admissão de Conexão (CAC)	8
2.6. Parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS)	9
2.7. Controle de Congestionamento	9
2.8. Conclusão	10
3. Redes de Petri	12
3.1. Histórico	12
3.2. Conceito	12
3.3. Aplicações e Vantagens	13
3.4. Apresentação Informal de Redes de Petri	14
3.5. Estrutura das Redes de Petri	14
3.5.1. Marcação de uma Rede de Petri	16
3.5.2. Sequência de Disparos	17
3.5.3. Matriz de Incidência Direta: Matriz A	17
3.5.4. Matriz de Incidência Reversa: Matriz B	17
3.5.5. Disparo de uma transição	18
3.5.6. Tabela de Marcação	18
3.5.7. Máquina de Senha de uma Rede de Petri	19
3.6. Modelando com Redes de Petri	20
3.6.1. Concorrência e Conflito	20
3.7. Propriedades das Redes de Petri	21
3.7.1. Propriedades Comportamentais	21
3.7.2. Propriedades Estruturais	21
3.8. Extensões às Redes de Petri	22
3.8.1. Redes de Petri Colorida	22
3.8.1.1. Composição das Redes de Petri Coloridas	22
3.8.1.2. Definição das Redes de Petri Coloridas	23
3.8.1.3. Associação de cores às marcas	23
3.8.1.4. Associação de funções aos arcos	24
3.8.2. Redes de Petri e a Representação do Tempo	24
3.8.2.1. Redes de Petri Temporais	24
3.8.2.2. Redes de Petri Temporizadas	25
3.8.3. Redes de Petri Nebulosas	26
3.8.3.1. Combinando Redes de Petri e Conjuntos Nebulosos	27
3.8.4. Redes de Petri para Sistemas Híbridos	27

3.9. Conclusão	28
4. Simulador	29
4.1. Módulo 1	29
4.1.1. Cálculo da Banda Efetiva - Fonte ON-OFF	30
4.1.2. Modelo de Fontes e Cálculo da Banda Efetiva	31
4.1.2.1. Fonte de Taxa Constante	31
4.1.2.2. Fonte Poissoniana	31
4.1.2.3. Fonte MMPP (<i>Markov-Modulated Poisson Process</i>)	32
4.2. Módulo 2	33
4.3. Módulo 3	36
4.3.1. Função CAC (Controle de Admissão de Conexão)	37
4.3.2. Curva de Rajada Probabilística (PBC)	39
4.4. Módulo 4	40
4.5. Interação entre os Módulos	40
4.6. Conclusão	42
5. Estudo de Caso	43
5.1. Primeiro Estudo de Caso	43
5.1.1. Teste 1	45
5.1.2. Teste 2	52
5.1.3. Dimensionamento da Largura de Banda e Tamanho de Buffer	56
5.1.4. Análise de Tamanho do Buffer por Nós	60
5.1.4.1. Análise do Nó 1	60
5.1.4.2. Análise do Nó 2	61
5.1.4.3. Análise do Nó 3	63
5.1.4.4. Análise do Nó 4	64
5.1.4.5. Análise do Nó 5	66
5.2. Segundo Estudo de Caso	69
5.2.1. Teste 1	71
5.2.2. Teste 2	75
5.2.3. Dimensionamento da Largura de Banda e Tamanho de Buffer	78
5.3. Conclusão	81
6. Conclusões Finais	83
Referências Bibliográficas	85
Lista de Acrônimos	89

Índice de Figuras

<i>Figura 3.1 - Exemplo de uma Rede de Petri</i>	15
<i>Figura 3.2 - Matrizes de Incidência Direta (A) e Reversa (B) da Rede de Petri da figura 3.1</i>	18
<i>Figura 4.1 - Procedimento para Análise dos Possíveis Caminhos entre M_0 e M_5</i>	35
<i>Figura 4.2 - Caminhos Resultantes da Análise Especificada na figura 4.1</i>	36
<i>Figura 4.3 - Interação entre os Módulos do Simulador</i>	41
<i>Figura 5.1 - Cenário do Primeiro Estudo de Caso</i>	43
<i>Figura 5.2 - Interface do Programa de Simulação</i>	46
<i>Figura 5.3 - Gráfico “Largura de Banda x Atraso”</i>	47
<i>Figura 5.4 - Gráfico “Largura de Banda x Células Perdidas”</i>	49
<i>Figura 5.5 - Gráfico “Tamanho de Buffer x Atraso”</i>	53
<i>Figura 5.6 - Gráfico “Tamanho de Buffer x Células Perdidas”</i>	54
<i>Figura 5.7 - Dimensionamento da Largura de Banda</i>	57
<i>Figura 5.8 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer</i>	58
<i>Figura 5.9 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer no Nó 1</i>	61
<i>Figura 5.10 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer no Nó 2</i>	62
<i>Figura 5.11 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer no Nó 3</i>	64
<i>Figura 5.12 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer no Nó 4</i>	66
<i>Figura 5.13 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer no Nó 5</i>	67
<i>Figura 5.14 - Cenário do Segundo Estudo de Caso</i>	70
<i>Figura 5.15 - Gráfico “Largura de Banda x Atraso”</i>	73
<i>Figura 5.16 - Gráfico “Largura de Banda x Células Perdidas”</i>	74
<i>Figura 5.17 - Gráfico “Tamanho de Buffer x Atraso”</i>	76
<i>Figura 5.18 - Gráfico “Tamanho de Buffer x Células Perdidas”</i>	77
<i>Figura 5.19 - Dimensionamento da Largura de Banda</i>	79
<i>Figura 5.20 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer</i>	80

Índice de Tabelas

<i>Tabela 3.1 - Tabela de Marcações da Rede de Petri da figura 3.1 com $M_0 = (2,0,0)$</i>	19
<i>Tabela 3.2 - Máquina de Senha da Rede de Petri da figura 3.1</i>	19
<i>Tabela 5.1 - Matriz de Incidência Direta do Cenário</i>	44
<i>Tabela 5.2 - Matriz de Incidência Reversa do Cenário</i>	44
<i>Tabela 5.3 - Valores de Simulação do Teste 1</i>	45
<i>Tabela 5.4 - Resultados da Simulação: Largura de Banda x Atraso</i>	47
<i>Tabela 5.5 - Resultados da Simulação: Largura de Banda x Células Perdidas</i>	48
<i>Tabela 5.6 - Dados obtidos na Simulação quando “largura de banda = 5”</i>	50
<i>Tabela 5.7 - Dados obtidos na Simulação quando “largura de banda = 25”</i>	51
<i>Tabela 5.8 - Taxas de Surto e Silêncio das Fontes ON-OFF</i>	52
<i>Tabela 5.9 - Valores de Simulação do Teste 2</i>	52
<i>Tabela 5.10 - Resultados da Simulação: Tamanho de Buffer x Atraso</i>	53
<i>Tabela 5.11 - Resultados da Simulação: Tamanho de Buffer x Células Perdidas</i>	54
<i>Tabela 5.12 - Taxas de Surto e Silêncio das Fontes ON-OFF</i>	55
<i>Tabela 5.13 - Resultados de Atraso e Células Perdidas variando a Largura de Banda</i>	56
<i>Tabela 5.14 - Resultados de Atraso e Células Perdidas variando o Tamanho do Buffer</i>	58
<i>Tabela 5.15 - Dados obtidos na simulação para “largura de banda = 13” e “tamanho do buffer= 10”</i>	59
<i>Tabela 5.16 - Resultados obtidos na Simulação variando o Tamanho do Buffer no Nó 1 da Rede</i>	60
<i>Tabela 5.17 - Resultados obtidos na Simulação variando o Tamanho do Buffer no Nó 2 da Rede</i>	62
<i>Tabela 5.18 - Resultados obtidos na Simulação variando o Tamanho do Buffer no Nó 3 da Rede</i>	63
<i>Tabela 5.19 - Resultados obtidos na Simulação variando o Tamanho do Buffer no Nó 4 da Rede</i>	65
<i>Tabela 5.20 - Resultados obtidos na Simulação variando o Tamanho do Buffer no Nó 5 da Rede</i>	67
<i>Tabela 5.21 - Valores de Simulação do Teste - melhor valor de Tamanho de Buffer por Nó</i>	68
<i>Tabela 5.22 - Dados obtidos na Simulação aplicando os melhores valores para o tamanho do buffer</i>	69
<i>Tabela 5.23 - Matriz de Incidência Direta do Cenário</i>	70
<i>Tabela 5.24 - Matriz de Incidência Reversa do Cenário</i>	71
<i>Tabela 5.25 - Valores de Simulação do Teste 1</i>	72
<i>Tabela 5.26 - Resultados da Simulação: Largura de Banda x Atraso</i>	72
<i>Tabela 5.27 - Resultados da Simulação: Largura de Banda x Células Perdidas</i>	73
<i>Tabela 5.28 - Taxas de Surto e Silêncio das Fontes ON-OFF</i>	74
<i>Tabela 5.29 - Valores de Simulação do Teste 2</i>	75
<i>Tabela 5.30 - Resultados da Simulação: Tamanho de Buffer x Atraso</i>	75
<i>Tabela 5.31 - Resultados da Simulação: Tamanho de Buffer x Células Perdidas</i>	76
<i>Tabela 5.32 - Taxas de Surto e Silêncio das Fontes ON-OFF</i>	77
<i>Tabela 5.33 - Resultados de Atraso e Células Perdidas variando a Largura de Banda</i>	78
<i>Tabela 5.34 - Resultados de Atraso e Células Perdidas variando o Tamanho do Buffer</i>	79
<i>Tabela 5.35 - Dados obtidos na simulação para “largura de banda = 13” e “tamanho de buffer = 10”</i>	81

1. Introdução

O Modo de Transferência Assíncrono (ATM - *Asynchronous Transfer Mode*) foi a tecnologia escolhida pela ITU-T (*International Telecommunication Union - Standardization Sector*) para a implementação da RDSI-FL (Rede Digital de Serviços Integrados de Faixa Larga), capaz de transportar tráfego multimídia (voz, dados, vídeo e texto). Segundo [CHA99], “o objetivo da RDSI-FL é transportar, simultaneamente, os vários tipos de tráfego de maneira eficiente, com padrões de interface bem definidas e operando em velocidades da ordem de dezenas a centenas de *Mbps*.”

A gerência de tráfego é um elemento fundamental para prover QoS (Qualidade de Serviço) em redes de telecomunicações. Em redes ATM, uma das funções principais da gerência de tráfego é o Controle de Admissão de Conexões (CAC: *Connection Admission Control*), que tem como objetivo avaliar se uma nova conexão requisitada deve ser atendida ou não. A análise de qualidade de serviço pode ser realizada baseando-se em seis parâmetros: atraso máximo de células, variação pico-a-pico do atraso máximo de célula, razão de perda de célula, razão de erro de célula, razão de blocos de célula severamente corrompidos e taxa de célula incorretamente inserida.

Com o intuito de conceber uma ferramenta para promover a análise de desempenho, a gerência de tráfego em redes ATM e dimensionar parâmetros de capacidade de *buffer* e largura de banda necessários para atender as conexões geradas, foi construído um simulador, em *Cbuilder* 4.0, que é composto por quatro módulos.

O primeiro módulo do simulador compreende a geração de conexões. As conexões geradas apresentam informações do tipo de serviço enviado, prioridade do serviço, taxa de transmissão, largura de banda (banda efetiva). As conexões geradas são armazenadas em uma estrutura denominada calendário, que as ordena de acordo com o tempo de chegada e de acordo com a prioridade. Na geração das conexões, são utilizadas fontes ON-OFF, que representam tráfego intermitente, que oscila entre períodos de surto e de silêncio. São tratados três tipos de serviços: dados, áudio e vídeo. Informações como a fonte geradora e o serviço transmitido são escolhidos aleatoriamente na geração de uma conexão.

O segundo módulo do simulador compreende a própria rede, que é composta por nós (computadores) e enlaces que interligam os nós. Este módulo é responsável por tomar a decisão

de qual o melhor caminho a ser utilizado para o encaminhamento das células ATM, geradas por uma determinada fonte, entre o nó origem e o nó destino. Para a representação, modelagem e implementação deste módulo foram utilizados os conceitos de Redes de Petri.

A utilização de Redes de Petri, para a implementação do segundo módulo, deve-se desde a sua representação gráfica, que é composta por um conjunto de lugares e um conjunto de transições, que é bem similar ao núcleo de uma rede de telecomunicações, até a manipulação da rede que é realizada através de uma análise das matrizes de incidência direta e reversa, que são resultantes das associações existentes entre os lugares e transições. Com a análise realizada sobre as matrizes é possível, a partir de uma marcação de entrada, montar uma tabela que contém todas as marcações decorrentes da inicial e uma máquina de senha, que apresenta todas as marcações acessíveis a partir da marcação inicial.

Tendo o domínio destes dois elementos da Rede de Petri, a tabela de marcações e a máquina de senha, pode-se obter os possíveis caminhos pelos quais pode ser realizado o encaminhamento das células ATM. Com o auxílio de algumas métricas, definidas na literatura, é possível encontrar o melhor caminho para a transmissão das células, caso a conexão seja aceita, o que é decidido pelo terceiro módulo do simulador.

O terceiro módulo é composto pela função CAC que realiza uma análise da rede para verificar a aceitação ou não das conexões geradas pelas fontes ON-OFF. Esta análise é baseada em dois parâmetros da rede – o tamanho do buffer e largura de banda disponíveis na rede, conforme proposto por [CHO97]. Este módulo analisa cada conexão armazenada no calendário e, para cada uma delas, invoca o segundo módulo para que este retorne os possíveis caminhos para o encaminhamento das células. Quando o segundo módulo retorna estes possíveis caminhos, o terceiro módulo irá analisá-los, de acordo com a seqüência crescente de nós, verificando se algum deles satisfaz a condição da função CAC e, caso encontre um caminho, as atividades de atendimento são temporizadas e o atendimento da conexão é realizado. Se nenhum caminho for encontrado para o encaminhamento das células, a conexão é rejeitada.

O quarto módulo do simulador é responsável por gerar estatísticas de atraso de conexões e taxa de células perdidas, que são os parâmetros de qualidade de serviço utilizados neste trabalho como forma de gerenciamento de tráfego e dimensionamento. São geradas também estatísticas com relação à porcentagem de conexões aceitas e com relação às taxas “ON” e “OFF” das fontes geradoras de tráfego.

O capítulo seguinte trata dos conceitos de Redes ATM como comutação por pacotes, requisitos de QoS (Qualidade de Serviço), tráfego ATM, controle de tráfego e de congestionamento. Um mecanismo para o controle de tráfego é a função CAC (Controle de Admissão de Conexão) que é responsável por verificar se uma determinada conexão poderá ser atendida, sem violar as demais conexões já aceitas. Aqui são apresentados os conceitos principais do protocolo MPLS (*Multiprotocol Label Switching*), que é um mecanismo para encaminhamento de pacotes e que poderia ser utilizado em um trabalho futuro e até mesmo em conjunto com Redes ATM.

No capítulo 3 são apresentados os conceitos de Redes de Petri, suas propriedades e as extensões das Redes de Petri. Vários conceitos como: matriz de incidência direta, matriz de incidência reversa, tabela de marcação, disparo de uma transição e máquina de senha são aplicados na construção do segundo módulo do simulador. O capítulo encerra com a apresentação de várias extensões de Redes de Petri como: Redes de Petri Colorida, Redes de Petri Temporizada, Redes de Petri Fuzzy, entre outras.

O simulador e os quatro módulos que o compõe são ressaltados no capítulo 4. Este capítulo apresenta as características e a função de cada módulo. Por fim, o capítulo apresenta como os quatro módulos interagem entre si.

O capítulo 5 apresenta dois estudos de casos que foram realizados através de dois cenários distintos com o objetivo de analisarmos as estatísticas geradas com relação ao atraso médio, a média de células perdidas, porcentagem de conexões aceitas e taxas de período ativo e de silêncio das fontes geradoras de tráfego. Em cada estudo de caso foram realizados dois testes, onde no primeiro foi feita a variação da largura de banda nos enlaces da rede e no segundo foi feita a variação no tamanho do buffer nos nós da rede. Com os resultados obtidos e unindo os gráficos resultantes entre o atraso e células perdidas foi possível estimar o melhor valor a ser aplicado tanto para a largura de banda quanto para o tamanho do buffer. Neste capítulo foi realizado um teste, para o primeiro estudo de caso, no qual foi aplicada uma variação de tamanho do buffer em cada nó, de forma independente, com o intuito de dimensionar o tamanho do buffer para cada nó da rede.

O capítulo 6 encerra o trabalho com as conclusões finais.

2. Redes ATM

2.1. Conceito

O Modo de Transferência Assíncrono (ATM) foi o modelo de rede adotado para a RDSI-FL (Rede Digital de Serviços Integrados de Faixa Larga) no final da década de 80. O objetivo da RDSI-FL é transportar, simultaneamente, os vários tipos de tráfego de maneira eficiente e operando em alta velocidade.

O ATM é uma tecnologia de alto desempenho com comutação e multiplexação de células (pacotes de tamanho fixo) para transportar diferentes tipos de tráfego.

A tecnologia ATM iniciou a nova era em sistemas de telecomunicações, caracterizada pela capacidade de armazenar e transmitir informação em altas taxas, sendo, portanto, especialmente útil para serviços que requeiram uma grande largura de banda tais como multimídia, videoconferência, vídeo sob demanda, etc.

Conforme [OLI98], “o ATM surgiu como técnica promissora para a construção de redes com integração de serviços e interconexão em alta velocidade”.

O ATM é uma tecnologia de comutação de pacotes de tamanho fixo e altas taxas, padronizada pelo ITU-T (*International Telecommunication Union - Standardization Sector*) e pelo ATM Forum.

2.2. Comutação de Pacotes

Segundo [SOA95], “na comutação de pacotes, as mensagens são segmentadas em unidades menores, denominadas pacotes, que podem ser de tamanho variável ou fixo. A principal vantagem dos pacotes de tamanho fixo é simplificar a comutação e diminuir o tamanho dos *buffers* nos nós de comutação. Entretanto, a comutação com pacotes de tamanho variável se adapta melhor à variada dimensão das mensagens”.

A comutação de pacotes é classificada em duas técnicas: *Datagrama*, que utiliza um modo de transmissão não orientado a conexão e *Circuito Virtual*, que utiliza um modo de transmissão orientado a conexão.

Na comutação de pacotes usando a técnica datagrama não há a necessidade de se estabelecer uma rota para que o usuário inicie a transmissão de dados e, dessa forma, os pacotes (datagramas) são tratados individualmente em cada nó de comutação, sendo entregues ao destino através do caminho mais adequado.

Para facilitar o encaminhamento de células, a Rede ATM utiliza a comutação por pacotes por Circuito Virtual, onde há a necessidade de estabelecer uma conexão entre a origem e o destino antes que os dados do usuário possam ser transmitidos. O caminho estabelecido entre a origem e o destino não é dedicado para uma conexão específica e, então, os comutadores ATM utilizam a multiplexação estatística, provendo uma maior utilização da largura de banda.

A tecnologia ATM opera, então, em modo orientado a conexão, estabelecendo uma conexão virtual entre a fonte e o destino. O circuito virtual, definido durante a aceitação da conexão, é estabelecido para todas as células, enquanto durar a conexão.

2.3. Célula ATM

Os pacotes da rede ATM, chamados de células, tem um comprimento fixo de 53 *bytes*, sendo 5 *bytes* de cabeçalho e 48 *bytes* de informação. O tamanho pequeno da célula reduz o tamanho dos *buffers* nos nós de comutação, bem como o tempo de transmissão da célula.

O caminho virtual e a conexão virtual são identificados no cabeçalho da célula a partir dos campos VPI (identificador de canal virtual) e VCI (identificador de caminho virtual). Estes campos formam o rótulo, no cabeçalho, utilizado pelos comutadores para encaminhar as células ao destino.

Segundo [OLI98], “o ATM opera com multiplexação estatística, significando que o meio de transmissão é compartilhado por diferentes fontes de tráfego, não havendo garantia de que o meio escoa totalmente o tráfego oferecido. Pode haver congestionamentos dos *buffers* da rede e, neste caso, as células esperam em filas até que possam ser transmitidas, podendo ainda a capacidade finita das filas ser excedida, ocorrendo perda de células”.

2.4. Tráfego ATM

A característica do tráfego de uma conexão ATM é descrita pelos parâmetros de tráfego. Segundo recomendação da ITU-T, os parâmetros de tráfego de uma fonte são agrupados nos descritores de tráfego de maneira a facilitar a troca de informação entre o usuário e a rede.

Os parâmetros de tráfego e de desempenho acordados pelo usuário e pela rede formam um contrato de tráfego.

Um contrato de tráfego descreve os parâmetros de qualidade de serviço negociados com a rede para um dado perfil de tráfego. Os parâmetros de qualidade de serviço são garantidos caso a fonte emissora respeite o perfil de tráfego negociado. O perfil de tráfego é descrito pelos seguintes parâmetros:

- *Taxa Sustentável de Célula (SCR - Sustainable Cell Rate)* - a média ao longo do tempo da quantidade de células por unidade de tempo que a fonte pode emitir.
- *Taxa de Pico de Células (PCR - Peak Cell Rate)* - a quantidade máxima de células por unidade de tempo que a fonte pode emitir durante um dado período de tempo.
- *Taxa Mínima de Células (MCR - Minimum Cell Rate)* - a quantidade mínima de células por unidade de tempo que a aplicação necessita para seu funcionamento.
- *Tamanho Mínimo de Rajada (MBS - Minimum Burst Size)* - a quantidade máxima de células que uma fonte pode emitir durante um surto de tráfego.

Segundo [VID97], “os parâmetros de tráfego podem ser definidos implicitamente a partir do tipo de serviço que será utilizado na conexão, pois cada serviço necessita que certos parâmetros de tráfego sejam atendidos para que possa ser atendido adequadamente. O tipo de serviço inclui também, implicitamente, a declaração dos requisitos de QoS desejados”.

Descritor de tráfego ATM é uma lista genérica de parâmetros de tráfego que pode ser utilizada para caracterizar uma conexão ATM. Descritor de tráfego da fonte é o conjunto de parâmetros de tráfego, pertencentes ao descritor de tráfego ATM, que define a característica de tráfego para a conexão que é requisitada pela fonte. Estes parâmetros são definidos pelo usuário no momento do estabelecimento da conexão. O pedido de conexão do usuário só poderá ser atendido se as características de serviço que ele necessita estiverem de acordo com os parâmetros de descritor de tráfego ATM.

O contrato de tráfego é um acordo firmado entre o usuário e a rede que tem como objetivo assegurar os seguintes aspectos do fluxo das células ATM:

- A qualidade de serviço (QoS) que deve ser fornecida pela rede.
- A regra para interpretar os parâmetros de tráfego.
- Os parâmetros de tráfego que especificam as características do fluxo de célula transmitido pelo usuário.
- Definição, pela rede, dos critérios que definem uma conexão que respeita os parâmetros contratados.

2.5. Controle de Tráfego

Para que a rede atinja a performance necessária para atender as conexões contratadas ou a serem contratadas, um controle de tráfego se faz necessário. O controle de tráfego utiliza as informações contidas no descritor de tráfego da fonte para realizar de modo eficiente as suas funções.

Segundo o ITU-T e o ATM Forum, o objetivo básico do gerenciamento de tráfego é evitar que a rede e os nós terminais sejam submetidos a congestionamentos, de forma a atingir o desempenho de Qualidade de Serviço contratado e promover o uso eficiente dos recursos da rede.

As funções básicas do Gerenciamento e Controle de Tráfego são:

- *Controle de Admissão de Conexão (CAC)*: visa determinar se uma nova conexão requisitada à rede deve ser atendida ou rejeitada por falta de recursos.

- *Controle de Parâmetros do Usuário (UPC) / Controle de Parâmetros da Rede (NPC)*: visa policiar o tráfego submetido à rede pelos nós terminais a fim de determinar e reagir às possíveis violações dos parâmetros de tráfego negociados com a rede.

- *Gerenciamento dos Recursos da Rede*: determina como os recursos devem ser alocados às diferentes categorias de serviços.

- *Controle de Descarte de Células*: visa determinar quais células devem ser descartadas quando uma situação de congestionamento ou violação de parâmetros do contrato é detectada.

- *Moldagem de Tráfego*: visa moldar o perfil de tráfego de acordo com as necessidades da rede e parâmetros do contrato. A moldagem de tráfego é um mecanismo que altera as características de tráfego de um fluxo de células com o objetivo de melhorar a eficiência da rede, reunindo os objetivos de QoS ou garantindo a conformidade do fluxo de células.

As funções de controle de tráfego são necessárias para garantir uma operação eficiente da rede e garantir que os valores dos parâmetros negociados no contrato de tráfego não serão violados. São funções com características preventivas, pois têm o objetivo de evitar congestionamentos em todos os elementos da rede.

Conforme [VID97], “o controle de tráfego fornece os meios necessários para um usuário garantir que o fluxo de células, por ele oferecido à rede, apresente a taxa especificada no contrato de tráfego e também, para a rede garantir que a taxa acordada no contrato de tráfego não seja violada pelos usuários, de tal modo que a performance da Qualidade de Serviço continue a ser alcançada por todos os usuários da rede ATM”.

2.5.1. Controle de Admissão de Conexão (CAC)

O controle de admissão de conexão é definido como um conjunto de ações tomadas pela rede durante o estabelecimento de uma conexão, de forma a determinar se a requisição pode ser aceita ou não.

Através do controle de admissão de conexão, uma rede analisa o pedido de conexão, que define parâmetros de tráfego da fonte e a classe de QoS requisitada para uma dada chamada, e aceita-o somente se recursos suficientes estiverem disponíveis para estabelecer a conexão através de toda a rede, atendendo a QoS requisitada pela conexão e mantendo a QoS acordada para as demais conexões já existentes na rede.

Após o pedido de conexão ser aceito pela rede, os descritores de tráfego da fonte serão monitorados pelo mecanismo de policiamento UPC/NPC.

O Controle de Parâmetros do Usuário (UPC) é definido como o conjunto de ações tomadas pela rede para monitorar e controlar o tráfego, em termos de tráfego oferecido e validação da conexão ATM. O objetivo principal é proteger os recursos da rede contra a má utilização por fontes de tráfego que excedam os limites especificados pelos descritores de tráfego, tomando atitudes apropriadas, como o descarte de células.

Segundo [OLI98], “o tratamento de uma conexão que utiliza a rede ATM pode ser descrito de maneira sucinta como: o usuário declara os valores de alguns parâmetros que descrevem o comportamento da conexão requerida, além do desempenho em relação à perda e atrasos. A rede utiliza esses valores de tráfego e desempenho para tomar a decisão se aceita ou

rejeita a conexão. Se aceitar, a rede policia a conexão para garantir que os valores de tráfego declarados não sejam ultrapassados. Este processo previne congestionamentos na rede e garante que o desempenho requerido para cada conexão seja atingido”.

2.6. Parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS)

A Qualidade de Serviço (QoS) é uma medida fim-a-fim, negociada entre o usuário e a rede.

Segundo a ITU-T, a QoS é definida em termos das seguintes medidas:

1. *Taxa de perda de células (CLR - Cell Loss Ratio)* - é o valor da razão de perda que a rede concorda em oferecer durante a existência da conexão e é definido como a razão entre o número de células perdidas e o número total de células transmitidas.

2. *Atraso de transferência de células (CTD - Cell Transfer Delay)* - é o tempo gasto para transferir uma célula da origem até o destino, sendo composto por vários componentes de atraso: atraso nos terminais de transmissão e recepção, atraso de transmissão entre os nós da rede ATM por onde passam as células e o atraso de processamento em cada nó ATM (devido a fila, comutação, etc). Portanto, atrasos podem ocorrer no lado do transmissor e receptor, em nós intermediários ATM e nos enlaces de transmissão que conectam os nós ATM.

3. *Variação de atraso de célula (CDV - Cell Delay Variation)* - ocorre quando células provenientes de duas ou mais conexões ATM são multiplexadas e células de uma dada conexão acabam sendo atrasadas enquanto células de outra conexão ATM são inseridas na saída do multiplexador.

2.7. Controle de Congestionamento

O controle de congestionamento em Redes ATM refere-se ao conjunto de ações realizadas pela rede para detectar o começo do congestionamento e minimizar a sua intensidade, duração e propagação através da rede. As ações do controle de congestionamento são disparadas pela ocorrência de congestionamento em um ou mais elementos da rede, tais como, porta de comutadores, *buffers*, enlaces de transmissão e em processos de Controle de Admissão de Conexão.

O controle de congestionamento é global, envolvendo todos os recursos da rede, e é realizado com o objetivo de garantir que a rede seja capaz de transportar o tráfego oferecido.

Segundo [VID97], “o controle de fluxo está relacionado com a regulação do tráfego fim-a-fim de uma conexão individual, isto é, entre o transmissor e o receptor. Sua finalidade é prevenir o transbordo de *buffers* dedicados a uma conexão, garantindo assim que o transmissor não transmita informação em uma taxa maior que a capacidade do receptor, com possível participação dos nós intermediários ao longo do caminho”.

As funções específicas do controle de congestionamento incluem:

- *Descarte seletivo de células* - é uma solução chave em Redes ATM cujo objetivo é o de dar tratamento preferencial às células com o campo CLP = 0 em relação às células com CLP = 1 durante períodos de congestionamento. O campo CLP (*Cell Loss Priority*) de apenas 1 bit, pertencente ao cabeçalho da célula ATM, indica se a células é passível de descarte ou não. Em caso de congestionamentos, as células com CLP = 1 são descartadas antes que as células com CLP = 0. A rede pode usar o descarte seletivo de célula para garantir que conexões que requeiram uma QoS garantida, baseada nos parâmetros acordados para um fluxo de célula CLP = 0, alcancem seus objetivos de performance.

- *Indicação de congestionamento enviado explicitamente para frente* - com esta função, os nós congestionados ao longo de um circuito virtual podem informar ao ponto final de destino sua condição de congestionamento através de uma alteração no campo PT do cabeçalho das células que passam por eles. O campo PT (*Payload Type*), de 3 bits, é utilizado para identificar a carga sendo transportada pela célula. Em caso de congestionamento, o campo PT das células é marcado como “experimentou congestionamento” e isto pode ser feito, por exemplo, quando o limiar de capacidade de buffer é excedido ou quando ocorrem falhas em equipamentos ou enlaces de transmissão. Sendo assim, a célula não é descartada, uma vez que a finalidade desta função é evitar a persistência da condição de congestionamento.

2.8. Conclusão

O objetivo deste capítulo foi o de apresentar os conceitos principais de Redes ATM e, entre eles, o conceito de QoS que é provido pela Rede ATM.

Foram abordadas, neste capítulo, as características das Redes ATM como: comutação de pacotes, célula ATM, o tráfego ATM, os parâmetros de QoS e o contrato de tráfego.

Foi ressaltada a necessidade do controle de tráfego e de congestionamento, em Redes ATM, para garantir que as conexões não violem os requisitos que foram contratados com a rede e para evitar a ocorrência de congestionamentos nos elementos da rede.

Foi tratada a função CAC (Controle de Admissão de Conexão) como uma forma de controle de tráfego que tem o objetivo de analisar se uma conexão poderá ser aceita ou não, sem violar os requisitos das conexões existentes.

O MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) é outro mecanismo que provê QoS. Foi proposto pela IETF (*Internet Engineering Task Force*) para garantir QoS à Internet. MPLS é um esquema de encaminhamento de pacotes que utiliza um rótulo de comprimento fixo para realizá-lo. Trata-se de um mecanismo que poderia ser tratado, em trabalhos futuros, como esquema de encaminhamento, e até mesmo em conjunto com Redes ATM. A operação básica do MPLS consiste em estabelecer um LSP (Caminho Comutado por Label) entre os nós de ingresso e de egresso. Este LSP é similar ao circuito virtual ATM e pode ser utilizado como um túnel para o encaminhamento de pacotes. O MPLS é um mecanismo eficiente porque provê uma rápida classificação e encaminhamento de pacotes e um eficiente mecanismo de tunelamento e de engenharia de tráfego.

3. Redes de Petri

3.1. Histórico

A teoria inicial das Redes de Petri foi apresentada na tese de doutorado “Kommunikation mit Automation” do Dr. Carl Adam Petri, em 1962, na faculdade de Matemática e Física da Universidade de Darmstadt, na Alemanha. Neste trabalho, Carl Petri formulou a base para a teoria da comunicação entre componentes assíncronos de um sistema de computação. Segundo [MAC96]:

“O trabalho de Petri atraiu a atenção de A. W. Holt que, em conjunto com outros pesquisadores, desenvolveu muito da teoria, notação e representação das Redes de Petri. Seguiram-se diversos trabalhos desenvolvendo estudos sobre seus aspectos teóricos e suas aplicações.”

3.2. Conceito

Redes de Petri é uma técnica de estudo e modelagem matemática de sistemas. Esta ferramenta foi projetada para modelar sistemas com componentes que interagem concorrentemente, onde as atividades de um componente podem ocorrer simultaneamente com outras atividades de outros componentes. A representação de concorrência é realizada através de mecanismos implícitos de fluxos de marcas na rede. Este fluxo é controlado por condições que habilitam a realização de tarefas (eventos).

A análise da Rede de Petri pode revelar importantes informações sobre a estrutura e o comportamento dinâmico do sistema modelado. Estas informações podem ser utilizadas para avaliar o sistema e para sugerir melhorias ou mudanças.

A aplicação de Redes de Petri na descrição e análise de sistemas concorrentes assíncronos que se comunicam, deve-se à sua simplicidade de funcionamento e à sua característica gráfica que permite uma visualização fácil dos sistemas modelados.

Segundo [VAL97], “o modelo de Redes de Petri foi proposto para modelar a comunicação entre autômatos para representar sistemas a eventos discretos, que são sistemas em que as variáveis de estado variam bruscamente em instantes determinados e que os valores das variáveis

nos estados seguintes podem ser calculados diretamente a partir de valores precedentes e sem ter que considerar o tempo entre dois instantes”.

Em sistemas a eventos discretos, o propósito é explicitar as interações entre os estados do processo e explicitar a tomada de decisão que irá controlá-los.

3.3. Aplicações e Vantagens

Os conceitos de Redes de Petri podem ser utilizados em diversas aplicações como: na avaliação do desempenho de sistemas, na análise e verificação formal de sistemas discretos, na modelagem e análise de protocolos de comunicação, no controle de oficinas de fabricação, na concepção de softwares de tempo real, sistemas de informação e sistemas de transporte, no gerenciamento de base de dados, na interface homem-máquina e em multimídia, etc.

Conforme [VAL97], a modelagem de sistemas com a utilização de Redes de Petri oferece as seguintes vantagens:

- Pode-se descrever uma ordem parcial entre vários eventos, o que possibilita levar-se em conta a flexibilidade;
- Os estados, bem como os eventos, são representados explicitamente;
- Uma única família de ferramentas é utilizada para a especificação, modelagem, análise e avaliação do desempenho e da implementação;
- Uma única família de ferramentas é utilizada nos diversos níveis da estrutura hierárquica do controle, o que facilita a integração destes níveis;
- Facilidade de modelar paralelismo e de combinar sistemas;
- Facilidade de modelar um sistema em vários níveis de abstração;
- Uma descrição precisa e formal das sincronizações é possível de ser realizada e é essencial para a segurança do funcionamento. Permite uma melhor representação da estrutura de controle dos programas, pois permite modelar a sequência de instruções e o fluxo de informação e de computação.

3.4. Apresentação Informal de Redes de Petri

Os elementos básicos das Redes de Petri são os lugares, transições, arcos e marcas (*tokens* ou senhas).

Um lugar é representado graficamente por um círculo. Pode ser interpretado como uma condição, um estado parcial, uma espera, um procedimento, um conjunto de recursos, um estoque, uma posição geográfica num sistema de transporte e outras. O lugar é denominado componente passivo e corresponde às variáveis de estado.

Uma transição é representada graficamente por uma barra e é associada a um evento (ação) que ocorre no sistema. As transições são denominadas componentes ativos. A realização de uma ação está associada a algumas pré-condições (condição de alguma variável de estado). Existe uma relação entre os lugares e as transições que possibilita a realização de uma ação, alterando as informações de alguns lugares (pós-condições).

Os arcos são os elementos que interligam lugares e transições. Os arcos que interligam lugares às transições representam a relação de condição que possibilita a execução das ações. Os arcos que interligam transições aos lugares representam a relação entre as ações e condições que se tornam verdadeiras após a execução das ações.

As marcas são representadas graficamente por um ponto no lugar. É um indicador significando que a condição associada ao lugar é verificada. Podem ser utilizadas para representar entidades abstratas (condições, estados) ou entidades físicas (recursos).

As Redes de Petri apresentam o seguinte comportamento dinâmico: o estado do sistema é dado pela distribuição de marcas nos lugares da rede e cada lugar representa um estado parcial do sistema. A cada evento que ocorre no sistema, é associada uma transição no modelo. A ocorrência de um evento faz com que o sistema passe do estado atual ao próximo estado, o que é representado pelo disparo da transição ao qual o evento está associado. O disparo da transição consiste de dois passos: retirar as marcas do lugar de entrada e adicioná-los ao lugar de saída.

3.5. Estrutura das Redes de Petri

Conforme [DAM90], conceitualmente, a estrutura de uma Rede de Petri R pode ser representada pela quintupla (P, T, I, O, M_0) , onde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$: conjunto finito de NL lugares da rede;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$: conjunto finito das NT transições da rede;

$I: T \times P \rightarrow N$: função de incidência direta (é a aplicação de entrada que mapeia transições aos lugares de entrada);

$O: T \times P \rightarrow N$: função de incidência reversa (é a aplicação de saída que mapeia transições aos lugares de saída);

N : conjunto dos números inteiros positivos, que representa o peso associado aos arcos;

M_0 : marcação inicial da rede, que corresponde ao estado inicial do sistema.

A representação gráfica da Rede de Petri é composta por um conjunto de lugares que correspondem aos círculos na rede, um conjunto de transições que correspondem às barras na rede e por arcos orientados que interligam os círculos e barras. São denominados lugares de entrada (lugares de ingresso) aqueles pelos quais saem arcos incidentes a uma transição. Portanto, p_i é um lugar de entrada de uma transição t_j se $p_i \in I(t_j)$. São denominados lugares de saída aqueles que são conectados à transição por arcos com origem na transição e término no lugar. Portanto, p_i é um lugar de saída de uma transição t_j se $p_i \in O(t_j)$. Pode-se ter múltiplas entradas ou múltiplas saídas de uma transição.

Um lugar pode estar vazio ou ocupado por uma ou mais marcas (*tokens*). Um exemplo de Rede de Petri é apresentado na figura 3.1.

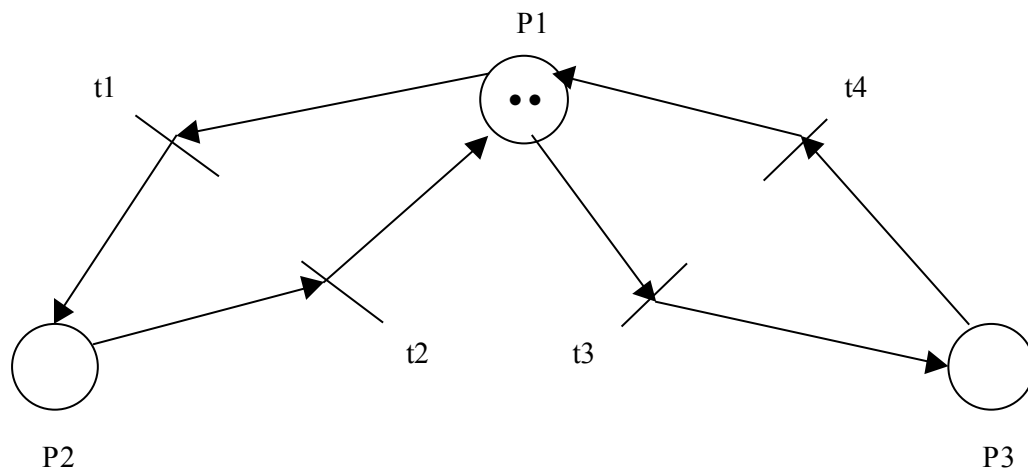


Figura 3.1 - Exemplo de uma Rede de Petri

Na Rede de Petri, as transições podem disparar, fazendo com que as marcas fluam de lugares a lugares da rede, alterando o estado da rede (marcação da rede). A cada arco, que une um lugar à transição ou vice-versa, é associado um número inteiro, que é denominado peso do arco.

Quando um arco une um lugar à transição, temos um peso do arco de entrada (p_e), que representa o número de marcas que o lugar de entrada perde caso haja o disparo da transição mencionada. Quando um arco une uma transição a um lugar de saída temos um peso de arco de saída (p_s), que representa o número de marcas que o lugar de saída ganha, caso haja o disparo da referida transição. Quando o peso não é especificado no arco, subentende-se que é 1.

O disparo de uma transição obedece às seguintes regras:

a) Uma transição é habilitada ou disparável se cada um dos lugares de entrada contém um número de marcas maior ou igual ao peso do arco que o une à transição.

b) O disparo de uma transição habilitada consiste em remover p_e marcas de cada um dos lugares de entrada e adicionar p_s marcas a cada um dos lugares de saída.

Nos tópicos a seguir será apresentada a formalização matemática das Redes de Petri.

3.5.1. Marcação de uma Rede de Petri

A marcação de uma rede de Petri indica o número de marcas (*tokens*) que cada lugar contém. A marcação inicial (M_0) corresponde ao estado inicial do sistema, a partir da qual a rede será analisada. Para a figura 3.1, $M_0 = (2, 0, 0)$. A presença de marcas em um lugar pode ser interpretada como a presença de um recurso de um determinado tipo.

Marcação decorrente é qualquer marcação acessível após um ou mais disparos, partindo de uma dada marcação inicial M_0 .

Formalmente, uma marcação é definida como uma função que mapeia o conjunto de lugares a inteiros não-negativos $M: P \rightarrow \mathbb{N}$. Uma marcação qualquer pode ser denotada como sendo um vetor coluna, de dimensão igual ao número total de lugares da rede, com cada componente representando o número de marcas que possui cada um dos lugares. Formalmente, a marcação pode ser definida como um vetor $M = (M(p_1), \dots, M(p_n))$.

Uma Rede de Petri Marcada é definida pela dupla $RM = (R, M_0)$, onde R é a estrutura da rede e M_0 é a marcação inicial.

3.5.2. Sequência de Disparos

É a sequência de transições disparáveis, que leva a rede de uma marcação M_j à M_k .

$$M_j \xrightarrow[s]{} M_k \quad \text{onde } s = \{t_i, t_j, \dots, t_n\}$$

S é a sequência de disparos das transições.

A execução de uma Rede de Petri é controlada pelo número e distribuição de marcas na rede. As marcas residem nos lugares e controlam a execução das transições na rede. A Rede de Petri executa o disparo das transições que provoca a remoção das marcas do lugar de entrada e cria novas marcas nos lugares de saída.

3.5.3. Matriz de Incidência Direta: Matriz A

Esta matriz apresenta a estrutura da rede quanto às informações dos lugares de entrada que incidem sobre cada transição específica e seu respectivo peso de entrada. É formada por NT linhas e NL colunas.

Os elementos da linha i e coluna j ($i=1,2,\dots,NT$; $j=1,2,\dots,NL$) denotado por A_{ij} contém as seguintes informações:

- a) Se $A_{ij} = 0$, o lugar p_j não é lugar de entrada da transição t_i ;
- b) Se $A_{ij} \neq 0$, o lugar p_j é um lugar de entrada da transição t_i com peso $p_e = A_{ij}$.

3.5.4. Matriz de Incidência Reversa: Matriz B

Esta matriz apresenta a estrutura da rede quanto às informações dos lugares de saída que são atingidos por cada transição específica e seu respectivo peso de saída. É formada por NT linhas e NL colunas.

Os elementos da linha i e coluna j ($i=1,2,\dots,NT$; $j=1,2,\dots,NL$) denotado por B_{ij} contém as seguintes informações:

- a) Se $B_{ij} = 0$, o lugar p_j não é lugar de saída da transição t_i ;
- b) Se $B_{ij} \neq 0$, o lugar p_j é um lugar de saída da transição t_i com peso $p_s = B_{ij}$;

As matrizes de incidência direta e reversa da Rede de Petri da figura 3.1 são apresentadas na figura 3.2.

$$A = \begin{bmatrix} 100 \\ 010 \\ 100 \\ 001 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 010 \\ 100 \\ 001 \\ 100 \end{bmatrix}$$

Figura 3.2 - Matrizes de Incidência Direta (A) e Reversa (B) da Rede de Petri da figura 3.1

3.5.5. Disparo de uma transição

O disparo de uma transição t_i , que está habilitada a disparar, é definido pela transformação da marcação M em uma nova marcação M' , realizada da seguinte forma:

$$M'(l_j) = M(l_j) + B_{ij} - A_{ij}$$

Onde $i = 1, \dots, NT$ e $j = 1, \dots, NL$

Deve-se destacar que uma transição t é disparável para uma marcação M se, e somente se, $M(p) \geq I(p, t)$ para todo $p_i \in P$. Após o disparo de uma transição t , retira-se um número de marcas, igual ao peso do arco de entrada, de todos os lugares de entrada p_i de t , e são criadas marcas nos lugares de saída. O número de marcas criadas em cada lugar de saída da transição t é igual ao peso do arco de saída.

3.5.6. Tabela de Marcação

A tabela de marcação da Rede de Petri é uma tabela contendo todas as marcações decorrentes obtidas a partir da marcação inicial M_0 . Estas marcações são obtidas conforme especificado no item anterior, de disparo de uma transição. Esta tabela pode ser representada na forma matricial. A tabela de marcação da Rede de Petri da figura 3.1 é apresentada na tabela 3.1 apresentada abaixo.

Tabela 3.1 - Tabela de Marcações da Rede de Petri da figura 3.1 com $M_0 = (2,0,0)$

<i>Marcação/Lugar</i>	p_1	p_2	p_3
M_0	2	0	0
M_1	1	1	0
M_2	1	0	1
M_3	0	2	0
M_4	0	1	1
M_5	0	0	2

3.5.7. Máquina de Senha de uma Rede de Petri

A Máquina de Senha de uma Rede de Petri é um gráfico que mostra todas as marcações (estados) acessíveis, a partir de uma marcação inicial M_0 . Ela pode ser representada de forma matricial com número de linhas igual a quantidade de marcações decorrentes mais uma marcação inicial e com NT colunas (número de transições). A linha define o estado que a rede está no momento e a coluna representa a transição disparada. Cruzando linha e coluna é possível saber qual a próxima marcação a ser atingida. A máquina de senha da Rede de Petri da figura 3.1 é apresentada na tabela 3.2 sob a forma matricial apresentada abaixo.

Tabela 3.2 - Máquina de Senha da Rede de Petri da figura 3.1

<i>Marcação/Transição</i>	t_1	t_2	t_3	t_4
M_0	1	-	2	-
M_1	3	0	4	-
M_2	4	-	5	0
M_3	-	1	-	-
M_4	-	2	-	1
M_5	-	-	-	2

3.6. Modelando com Redes de Petri

Segundo [PET81], “Redes de Petri são utilizadas para modelar a ocorrência de vários eventos e atividades no sistema. É uma ferramenta que permite modelar o fluxo de informação ou outros recursos dentro do sistema”.

Uma visão simples de Redes de Petri de um sistema se concentra em dois conceitos primitivos – eventos e condições. Eventos são ações que os lugares executam no sistema. A ocorrência desses eventos é controlada pelo estado do sistema. O estado do sistema pode ser descrito como um conjunto de condições. Uma condição é um predicado que pode tomar o valor falso ou verdadeiro.

Para que um evento ocorra, é necessário que algumas condições sejam satisfeitas. Estas condições são denominadas pré-condições. A execução do evento leva a uma outra condição, denominada pós-condição.

3.6.1. Concorrência e Conflito

Em Redes de Petri, dois eventos, que são habilitados e não interagem, podem ocorrer independentemente. Redes de Petri é uma ferramenta ideal para modelar sistemas de controle distribuído com múltiplos processos executando concorrentemente.

Não existe uma medida de tempo ou fluxo de tempo em Redes de Petri. A execução é visualizada como uma sequência de eventos discretos. A execução é denominada não-determinista, pois, em um dado momento, uma transição que está habilitada pode ser disparada, gerando uma nova ordem de ocorrência de disparos.

O disparo de uma transição é considerado um evento instantâneo, de tempo zero, e a ocorrência de dois eventos não podem ser simultâneas. Os eventos modelados são chamados eventos primitivos (evento de tempo zero) e não-simultâneos.

O disparo de transições não-determinísticas e não-simultâneas, na modelagem de sistemas concorrentes, pode ser realizado de duas maneiras:

- a) Duas transições estão habilitadas e uma não afeta a outra e a sequência de eventos ora inicia com uma transição e ora inicia com outra;

- b) **Condição de Conflito:** quando duas transições habilitadas estão em conflito, somente uma delas pode disparar e, com o disparo, irá remover as marcas da entrada compartilhada e desabilitar a outra transição.

3.7. Propriedades das Redes de Petri

As principais propriedades da Rede de Petri podem ser divididas em 2 grupos: propriedades comportamentais, que dependem da marcação, e propriedades estruturais, que não dependem da marcação.

3.7.1. Propriedades Comportamentais

- 1) *Alcançabilidade:* propriedade fundamental para o estudo de propriedades dinâmicas de qualquer sistema. Indica a possibilidade de atingirmos uma determinada marcação pelo disparo de um número finito de transições, a partir de uma marcação inicial.
- 2) *Limitabilidade:* em uma rede de Petri limitada, o número de marcações é finito. Por outro lado, uma rede de Petri não limitada possui infinitas marcações, significando que o sistema físico correspondente é impossível de ser implementado. Uma rede de Petri com $n=1$ é chamada de rede de petri segura (quando todos os lugares contêm uma marca).
- 3) *Vivacidade:* uma Rede de Petri é dita viva para uma marcação inicial M_0 se, para qualquer marcação decorrente M , existir uma sequência de disparos s que torne disparável qualquer transição da rede.
- 4) *Reiniciabilidade:* Uma Rede de Petri é reiniciável para uma dada marcação inicial M_0 se, para qualquer marcação decorrente M , existir uma sequência de disparo s que faça a rede voltar à marcação inicial.

3.7.2. Propriedades Estruturais

As propriedades estruturais refletem características da estrutura da rede e não são influenciadas pela marcação. Entre elas temos:

- 1) *Limitação Estrutural*: uma Rede de Petri é estruturalmente limitada se é limitada para qualquer marcação inicial.
- 2) *Conservação*: uma Rede de Petri é dita conservativa se, com o disparo de qualquer transição, o número de marcas da rede não se altera.
- 3) *Repetitividade*: uma Rede de Petri é repetitiva se existe um sequência de disparos s tal que toda transição $t_i \in T$ dispara um número infinito de vezes em s .
- 4) *Consistência*: uma Rede de Petri é consistente se, para uma sequência de disparos s , toda transição $t_i \in T$ dispara ao menos uma vez em s .

3.8. Extensões às Redes de Petri

A seguir serão apresentadas algumas variações das Redes de Petri. São modelos que visam suprir algumas deficiências das Redes de Petri e que propõem uma estruturação da parte de dados do sistema.

3.8.1. Redes de Petri Colorida

Nas Redes de Petri existe apenas um tipo de marca, o que não permite a diferenciação de recursos em um lugar, sendo necessário lugares distintos para expressar recursos similares.

Conforme [MAC96], “o objetivo das Redes de Petri Coloridas é promover a redução do tamanho do modelo, permitindo que marcas individualizadas (cores) representem diferentes recursos em uma mesma sub-rede”.

Inicialmente, as marcas das redes coloridas eram representadas por cores. Em trabalhos mais recentes, as marcas são representadas por estruturas de dados complexas, definidas como tipos de dados e é possível efetuar operações complexas sobre estes dados.

3.8.1.1. Composição das Redes de Petri Coloridas

As Redes de Petri Coloridas são compostas por: estrutura, declarações e inscrições.

- *Estrutura*: É uma grafo dirigido com dois tipos de vértices (lugares e transições). Os lugares são representados por círculos e as transições por retângulos. Cada lugar pode

armazenar diversas marcas e cada uma dessas marcas pode representar valores associados a tipos de dados complexos.

- *Declarações*: Compreendem a especificação dos conjuntos de cores e declarações de variáveis. Cada lugar tem um conjunto de cores associado (tipo). As marcas armazenadas nesse lugar devem ter a mesma cor.
- *Inscrições*: São associadas a cada lugar, transição e arcos. Os lugares têm três tipos de inscrições: nome, conjunto de cores e expressão de inicialização (marcação inicial). As transições têm dois tipos de inscrições: nome e expressões lógicas, que são booleanas que devem ser atendidas para que haja o disparo das transições. Os arcos têm um tipo de inscrição: expressões, que podem conter variáveis, constantes, funções e operações.

3.8.1.2. Definição das Redes de Petri Coloridas

Segundo [VAL97], “Redes de Petri Coloridas R_c é uma sêxtupla dada por: $(P, T, C_{or}, C_{sc}, W, M_0)$ onde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$: conjunto finito de NL lugares da rede;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$: conjunto finito das NT transições da rede;

C_{or} é um conjunto finito de cores;

C_{sc} é a função sub-conjunto de C_{or} . $C_{sc}: P \cup T \rightarrow P(C_{or})$;

W é a função de incidência onde cada elemento $W(p, t)$ de W é uma função $w(p, t): C_{sc}(t) \times C_{sc}(p) \rightarrow N$;

N é o conjunto dos números inteiros positivos, que representa o peso associado aos arcos;

M_0 é a marcação inicial que associa, para cada lugar e para cada cor possível neste lugar, um número de marcas $M_0(p): C_{sc}(p) \rightarrow N$ ”.

3.8.1.3. Associação de cores às marcas

Com o objetivo de diferenciar as marcas, são associadas cores (números inteiros) a estas. A cada lugar se associa o conjunto de cores das marcas deste lugar. A cada transição se associa um conjunto de cores que corresponde às diferentes maneiras de disparar uma transição.

3.8.1.4. Associação de funções aos arcos

Na rede colorida, os rótulos dos arcos são funções que representam matrizes de inteiros. Para cada cor de uma transição (maneira de dispará-la) é necessário descrever quais cores de marcas serão retiradas dos lugares de entrada e quais cores de marcas serão inseridas nos lugares de saída. A função tem como domínio o produto cartesiano entre o conjunto de cores da transição e o conjunto de cores do lugar (entrada ou saída). O conjunto imagem da função $I(p,t): C_{sc}(t) \times C_{sc}(p) \rightarrow N$ descreve quantas marcas de cada cor devem ser retiradas do lugar de entrada e o conjunto $O(p,t): C_{sc}(t) \times C_{sc}(p) \rightarrow N$ descreve quantas marcas de cada cor devem ser colocadas no lugar de saída.

3.8.2. Redes de Petri e a Representação do Tempo

A Rede de Petri permite descrever causalidade (um evento é consequência de um outro evento), decisão e independência entre eventos.

O tempo faz parte do controle ao invés de ficar na parte de dados de forma não estruturada. Existem duas classes de modelo: Redes de Petri Temporais e Redes de Petri Temporizadas.

3.8.2.1. Redes de Petri Temporais

As Redes de Petri Temporais associam, a cada transição, uma duração de sensibilização. O disparo é instantâneo, mas a transição deve estar habilitada durante o intervalo de tempo dado. Um intervalo $(\theta_{min}, \theta_{max})$ é associado a cada transição e a duração de sensibilização deve ser maior que θ_{min} e menor que θ_{max} e, portanto, a transição deve disparar antes de θ_{max} . Durante a sensibilização, as marcas continuam a ser vistas por outras transições de saída do lugar.

Definição: Uma Rede de Petri Temporal é um par $R_t = (R, \theta(t))$ onde:

R é uma rede de petri composta por (P, T, I, O, M_0) ;

$\theta(t) = [\theta_{min}(t), \theta_{max}(t)]$ é uma função que, a cada transição t , associa um intervalo fechado racional que descreve uma duração de sensibilização.

3.8.2.2. Redes de Petri Temporizadas

O modelo de Redes de Petri Temporizadas é considerado o mais apropriado na modelagem e análise de protocolos de comunicação que possuam temporizadores e/ou atrasos variáveis na troca de informação [DAM90].

Uma Rede de Petri Temporizada é definida como um par $R_t = (R, \theta_f)$ onde:

R é uma Rede de Petri composta por (P, T, I, O, M_0) ;

$\theta_f = T \rightarrow Q^+$ é uma função de duração de disparo que associa, a cada transição, um número racional positivo que descreve a duração do disparo.

Neste modelo é associada uma duração de disparo às transições. Pode-se ter lugares temporizados e arcos temporizados.

Tempo Associado ao Lugar: Quando o tempo está associado ao lugar, ele representa a quantidade mínima de tempo que as marcas têm para permanecerem no lugar desde que aconteceu o disparo. De acordo com [VAL97], “se um lugar representa uma atividade A , trata-se de colocar θ como a duração desta atividade. Quando a marca chega no lugar p , ela só pode deixá-lo após θ instantes. Enquanto a atividade está sendo executada, a marca não pode ser utilizada para disparar a transição. A marca é dita indisponível. Quando a atividade termina, a marca se torna disponível e a transição pode ser disparada”.

Tempo Associado à Transição: quando o tempo está associado à transição representa operações que são consumidoras do tempo. Neste modelo é associada uma duração de disparo a cada transição. Representa uma noção de atraso durante o qual as marcas utilizadas para disparar a transição não são disponíveis em nenhum lugar. A partir do momento que a marca torna-se disponível, ela pode ser utilizada por qualquer transição de saída deste lugar. O disparo não é instantâneo, mas possui uma duração. A transição é interpretada como uma atividade e não como um evento instantâneo. Supõe-se que esta atividade não é interrompível. Neste modelo, as marcas assumem dois estados: reservado e não reservado. As marcas não reservadas podem sensibilizar a transição.

O tempo associado à transição pode ser determinístico ou estocástico, gerando outra classificação para as Redes de Petri:

- *Redes de Petri Temporizadas Determinísticas:* Neste modelo, o tempo associado à transição é constante.

- *Redes de Petri Temporizadas Estocásticas*: Neste modelo, uma variável aleatória é associada à transição. O tempo de disparo da transição é o tempo obtido pela variável aleatória. O tempo necessário para disparar uma transição t é diferente do tempo necessário para disparar a próxima transição. Equivale associar, a cada transição, um intervalo contínuo de sensibilização $[0, \infty)$ com uma distribuição exponencial.

Definição: Redes de Petri Estocásticas é um par $R_{es} = (R, \lambda)$ onde:

R é uma rede de petri composta por (P, T, I, O, M_0) ;

λ é uma função que associa, a cada transição t , uma taxa de transição $\lambda(t)$.

A duração média de sensibilização da transição é $\theta_S = 1/\lambda(t)$.

3.8.3. Redes de Petri Nebulosas

Redes de Petri são indicadas para representar estados de sistemas dinâmicos constituídos de processos concorrentes que repartem recursos, mas não é adequada para tratar com a incerteza do sistema, caso exista.

O desenvolvimento da tecnologia computacional possibilitou uma variedade de métodos, técnicas e ferramentas para resolver problemas associados com o projeto e a operação de sistemas dinâmicos. Sistemas dinâmicos são sistemas dirigidos por eventos instantâneos. Os aspectos desses sistemas são a evolução no tempo e a incerteza concernente às informações com as quais eles tratam.

O aspecto dinâmico, de um sistema a eventos discretos, é capturado pela Rede de Petri de um modo formal e ao mesmo tempo natural. Se a Rede de Petri é um modelo de um sistema físico e é implementada em tempo real de modo concorrente à sua evolução, as transições são somente disparadas quando se tem certeza de que o evento associado de fato ocorreu. É possível representar o tempo e a comunicação com o meio externo, mas não é possível representar uma informação incompleta.

Os conjuntos nebulosos foram introduzidos por Zadeh, da Universidade de Berkeley, em 1965. Tais conjuntos permitem tratar com a representação de classes cujos limites não são bem determinados, através de funções características que assumem valores no intervalo $[0,1]$. É uma ferramenta poderosa para a representação do conhecimento, pois permite considerar categorias vagas e flexíveis que são muito utilizadas em sistemas de controle.

3.8.3.1. Combinando Redes de Petri e Conjuntos Nebulosos

- **Marcações:** as marcações nebulosas poderiam ser definidas associando a cada lugar um número nebuloso indicando o número de marcas no lugar. A marcação nebulosa quantifica a incerteza da existência de uma marca no lugar.
- **Transições:** embora no modelo clássico de Redes de Petri as marcas sejam removidas no disparo das transições, não é sempre o caso quando a Rede de Petri é usada com técnicas de Inteligência Artificial. A maioria dos trabalhos tem um fator de certeza associado à transição. Como a transição, na Rede de Petri Nebulosa, corresponde a uma regra num sistema de produção, o disparo de uma sequência de transições define uma sequência de disparo nebulosa que é mais ou menos possível de ser disparada. Uma outra abordagem feita é associar uma função de autorização à transição e é definido um pseudodisparo quando existe uma informação imprecisa ou incerta.

Durante a operação normal, a Rede de Petri Nebulosa se comporta como uma Rede de Petri clássica. A cada transição é associada uma data nebulosa. Esta data é comparada com o tempo corrente para verificar se a transição ainda não foi disparada, ou se ela já foi disparada com certeza, ou se é possível que tenha sido disparada.

3.8.4. Redes de Petri para Sistemas Híbridos

O modelo de um sistema dinâmico é híbrido se as variáveis de estado forem de dois tipos: contínuas (valores reais) e discretas (valores inteiros). Tanto as variáveis de estado quanto o tempo podem ser de dois tipos: discreto ou contínuo.

O tempo também é híbrido, o que implica utilizar dois tipos de modelos: um modelo contínuo e um modelo a eventos discretos.

O modelo híbrido é formado de um modelo discreto, representado pela Rede de Petri, e completado com uma variável contínua – o tempo.

Os modelos híbridos são utilizados, por exemplo, em sistemas de motores, em controle de sistemas de manufatura.

3.9. Conclusão

O objetivo deste capítulo foi o de apresentar os conceitos de Redes de Petri que foram aplicados na modelagem, representação e implementação do segundo módulo do simulador, apresentado no capítulo 4.

Os conceitos aplicados foram: matriz de incidência direta, matriz de incidência reversa, tabela de marcação, máquina de senha e disparo de transição.

A Rede de Petri é aplicada no simulador para a representação e tratamento interno da rede, composta por nós e enlaces, e para a manipulação de estruturas que permitem encontrar possíveis caminhos, de um nó origem a um nó destino, para o encaminhamento de células ATM.

Foram ressaltadas as propriedades das Redes de Petri que a tornam uma boa ferramenta para modelar fluxo de informação e a ocorrência de eventos e atividades em um sistema.

Por último, foram apresentadas algumas extensões de Redes de Petri que poderiam ser aplicadas em trabalhos futuros. Entre estas redes temos: Rede de Petri Colorida, Rede de Petri Temporizada, Rede de Petri Fuzzy, entre outras.

4. Simulador

A construção do simulador foi proposta com o objetivo de desenvolver uma ferramenta de controle de tráfego para Redes ATM baseada na função CAC. Também é intuito do simulador, dimensionar uma rede ATM, segundo parâmetros como buffer e largura de banda, que são necessários para atender requisitos de Qualidade de Serviço (QoS). O método de dimensionamento utilizado é baseado em banda efetiva, segundo o qual a capacidade do enlace (arco entre dois nós da rede) deve ser igual ou superior à soma das capacidades efetivas dos tráfegos do enlace. A vantagem de utilizar este método é que ele simplifica o dimensionamento.

O simulador foi implementado na linguagem *CBuilder 4.0* e é composto por quatro módulos descritos a seguir.

4.1. Módulo 1

O primeiro módulo do simulador é responsável pela geração de conexões ATM. Para a geração das conexões foram consideradas fontes do tipo ON-OFF e com os seguintes: largura de banda necessária, tipo de serviço transmitido, prioridade do serviço, taxa de transmissão (marcação inicial para a Rede de Petri) e outros. Foram considerados três tipos de serviços – dados, áudio e vídeo, os quais podem adotar várias possibilidades de prioridades.

A fonte ON-OFF é um dos modelos mais utilizados nos estudos de desempenho de redes devido à sua capacidade de representar tráfego intermitente, que alterna períodos de surto e períodos de silêncio. A informação é enviada numa sucessão de períodos ativos (on), intercalados com períodos de silêncio (off).

Na geração de cada conexão é escolhida aleatoriamente uma das fontes ON-OFF e é calculada a banda efetiva (largura de banda) para esta fonte. Para esta fonte de tráfego é definida uma taxa de transmissão de células, o tipo de serviço e sua prioridade. Deve-se ressaltar a aleatoriedade na determinação destes dados.

Durante a simulação, estas conexões são geradas em tempos aleatórios e armazenadas em uma estrutura denominada calendário, que ordena as conexões de acordo com o tempo de chegada e de acordo com a prioridade do serviço, caso o tempo de chegada seja o mesmo para duas ou mais conexões.

4.1.1. Cálculo da Banda Efetiva - Fonte ON-OFF

Segundo [OLI98], “a fonte ON-OFF é uma fonte MMPP (*Markov-Modulated Poisson Process*) de 2 fases. Uma fonte é MMPP se a geração de células é poissoniana com taxa λ função de uma cadeia de Markov contínua no tempo”.

As duas fases da fonte ON-OFF são: uma na qual a fonte transmite a uma taxa λ e outra na qual a fonte fica em silêncio. A fonte permanece em cada fase durante um tempo aleatório exponencialmente distribuído.

Conforme a análise da Fonte MMPP, apresentada no próximo item e aplicada para apenas duas fases da fonte ON-OFF, a matriz diagonal (A) e a matriz que apresenta as taxas de transmissão entre as duas fases (R) são representadas da seguinte maneira:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda 0 \\ 0 0 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} -1/T_{ON} & +1/T_{ON} \\ +1/T_{OFF} & -1/T_{OFF} \end{bmatrix}$$

Onde, T_{ON} e T_{OFF} são os tempos médios de permanência em cada fase. A banda efetiva (c) para fontes do tipo fluido markoviano *ON-OFF* é:

$$c = \alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta}$$

Onde

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(R - \frac{1}{\delta b} - \frac{1}{\delta T_{OFF}} \right)$$

$$\beta = \frac{R}{\delta T_{OFF}}$$

O período “OFF” médio é dado por:

$$T_{OFF} = \frac{b(1-r)}{r}$$

δ é um valor real utilizado no cálculo da banda efetiva dado por:

$$\delta = \frac{\ln(1/\epsilon)}{K}$$

Onde, ε é a taxa de perda de células (CLR) especificada no contrato de tráfego, b é comprimento médio do surto, r é a taxa de utilização da fonte, R é a taxa de pico da fonte e K é o tamanho do buffer em células.

4.1.2. Modelo de Fontes e Cálculo da Banda Efetiva

A característica modular do simulador torna possível a utilização de outras fontes geradoras de tráfego e até mesmo a utilização de diferentes fontes na geração de conexões. A seguir são apresentados outros modelos de fontes e a respectiva obtenção da banda efetiva.

4.1.2.1. Fonte de Taxa Constante

O caso mais simples de cálculo de banda efetiva é o de uma fonte com taxa de geração de células constante λ .

Neste caso, $N(t) = \lambda t$ e, então, o número de células geradas no intervalo de tempo $(0, t)$ é determinístico. O cálculo da banda efetiva, baseado no momento logarítmico proposto por Kesidis [OLI98], é:

$$c = \frac{1}{\delta} \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{\ln E\{e^{N(t)\delta}\}}{t} = \frac{1}{\delta} \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{\ln E\{e^{\lambda t \delta}\}}{t} = \lambda$$

Sendo assim, a banda efetiva de uma fonte de taxa constante é $c = \lambda$.

4.1.2.2. Fonte Poissoniana

Uma fonte poissoniana tem a taxa de geração de células com distribuição de probabilidade de Poisson, que é da seguinte maneira:

$$\Pr\{N(t) = n\} = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$$

Portanto, o cálculo da banda efetiva, baseado no momento logarítmico proposto por Kesidis [OLI98], é:

$$E\{e^{N(t)\delta}\} = \sum_{n=0}^{+\infty} e^{n\delta} \Pr\{N(t) = n\} = e^{\lambda(e^\delta - 1)t}$$

$$c = \frac{1}{\delta} \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{\ln E\{e^{N(t)\delta}\}}{t}$$

$$c = \frac{\lambda(e^\delta - 1)}{\delta}$$

Observa-se que, para $\delta \rightarrow 0, c \rightarrow \lambda$.

4.1.2.3. Fonte MMPP (*Markov-Modulated Poisson Process*)

O modelo MMPP consiste de uma fonte de tráfego com um certo número de fases (i). A fonte muda de fase conforme uma cadeia de Markov contínua no tempo. Quando a fonte se encontra na fase i , gera células aleatoriamente com taxa média λ_i , segundo um processo de Poisson.

A Fonte MMPP é caracterizada pelas matrizes características: Λ e R . A matriz Λ é uma matriz diagonal com λ_i de cada fase i . R é a matriz que apresenta as taxas de transição entre as fases.

q é o vetor linha de probabilidades estacionárias de fase da fonte e u é o vetor coluna unitário e são denotados por:

$$qR = 0$$

$$qu = 1$$

Conforme [OLI98], “a matriz de probabilidades $Pr(n,t)$ da fonte gerar n células no intervalo de tempo t , dado que no início do intervalo a fonte estava na fase i e, no final, está na fase j , é dado por”:

$$Pr(n, t) = \frac{e^{(R-\Lambda)t} (\Lambda t)^n}{n!}$$

O cálculo da banda efetiva, para a fonte MMPP, baseado no momento logarítmico proposto por Kesidis [OLI98], é:

$$E\{e^{N(t)\delta}\} = q \sum_{n=0}^{+\infty} e^{n\lambda} \frac{e^{(R-\Lambda)t} (\Lambda t)^n}{n!} u = q e^{[R+(e^\delta-1)\Lambda]t} u$$

$$c = \frac{1}{\delta} \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{\ln E\{e^{N(t)\delta}\}}{t} = \frac{1}{\delta} \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{\ln q e^{[R+(e^\delta-1)\Lambda]t} u}{t}$$

$$c = \frac{1}{\delta} \text{eig max}[R + (e^\delta - 1)\Lambda]$$

Onde $\text{eig max}[A]$ é o maior autovalor real da matriz A .

Caso Particular: Fonte MMPP de 2 fases

T_1 e T_2 : tempo médios de permanência em cada fase.

λ_1 e λ_2 : taxas médias de geração de células em cada fase.

O cálculo da banda efetiva é:

$$c = \alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta}$$

Onde

$$\alpha = \frac{1}{2\delta} [(e^\delta - 1)(\lambda_1 + \lambda_2) - \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}]$$

$$\beta = [-\lambda_1 \lambda_2 (e^\delta - 1) + \frac{\lambda_1}{T_2} + \frac{\lambda_2}{T_1}] \frac{(e^\delta - 1)}{\delta^2}$$

4.2. Módulo 2

O segundo módulo do simulador é responsável pela simulação do tratamento interno realizado pela rede. Foi modelado, representado e implementado através dos conceitos de Redes de Petri. Este módulo, juntamente com a formalização matemática de Redes de Petri, utiliza-se do cenário que é inserido pelo usuário, no início da simulação, através das matrizes de incidência direta e reversa para resolver a análise dos possíveis caminhos a serem utilizados para a

transmissão dos pacotes de uma dada conexão gerada e que foi aceita pelo terceiro módulo, descrito a seguir.

As Redes de Petri representam o núcleo da rede, onde os lugares representam os nós da rede e os arcos representam os enlaces da rede, que interligam os nós. Cada lugar apresenta uma capacidade que é referente ao *buffer* disponível nos nós da rede e os arcos apresentam um peso que é referente à largura de banda disponível nos enlaces entre os nós da rede. Os tokens que ocupam os lugares, para uma rede de computadores, são referentes às células que ficam armazenadas nos lugares (*buffers*) para serem transmitidas de lugar a lugar (nó a nó) até que alcancem o nó destino.

A marcação inicial, no simulador, refere-se ao número de células que devem ser transmitidas por uma dada fonte geradora de tráfego, do nó origem ao nó destino. As marcações decorrentes são resultantes de uma sequência de disparos até o destino.

A transmissão de células de um nó origem a um nó destino, é realizada de acordo com o disparo de transições, conceito apresentado no capítulo 3. O disparo de uma transição provoca a retirada de células de um lugar de saída, que são colocadas em um lugar de entrada, o que leva então a uma nova marcação para a rede.

O segundo módulo é invocado pelo módulo três à cada conexão gerada. O objetivo é retornar os caminhos pelos quais as células poderão ser encaminhadas desde o nó origem até o nó destino. Para a resolução destes possíveis caminhos, o módulo dois utiliza o cenário inserido pelo usuário, representado pelas matrizes de incidência direta e reversa.

As matrizes de incidência direta e reversa representam a rede, composta por nós e enlaces. Manipulando estas duas estruturas, utilizando-se a informação da marcação inicial (taxa de transmissão em células pela fonte de tráfego) e os conceitos de disparo de transição, constrói-se duas novas estruturas: a tabela de marcação e a máquina de senha.

A tabela de marcação da Rede de Petri é uma tabela que contém a informação de todas as marcações obtidas a partir da marcação inicial M_0 . Para o simulador, esta tabela de marcação é resolvida para cada conexão que é aceita pela função CAC do módulo três. O preenchimento desta tabela é inicializado a partir da marcação inicial, que provê o cálculo das marcações seguintes, de acordo com a regra de disparo de transições, que é baseada na marcação anterior e nas matrizes de incidência direta e reversa.

A máquina de senha apresenta a ligação entre as marcações e as transições da Rede de Petri. Permite descobrir qual marcação é atingida a partir de uma marcação anterior e disparo de

uma determinada transição. O preenchimento da máquina de senha é realizado através da combinação entre as transições e as marcações obtidas, iniciando pela marcação inicial M_0 . Para o simulador, esta máquina de senha é resolvida para cada conexão que é aceita pela função CAC do terceiro módulo do simulador.

Após o preenchimento da tabela de marcação e da máquina de senha, para uma dada conexão, o simulador realiza a montagem de uma tabela com os possíveis caminhos a serem percorridos entre o nó origem (marcação inicial) até o nó destino (marcação final).

Foi implementado um algoritmo recursivo para a análise dos possíveis caminhos. Pode-se acompanhar essa análise pela figura 4.1, que se refere a Rede de Petri do cenário apresentado na figura 3.1.

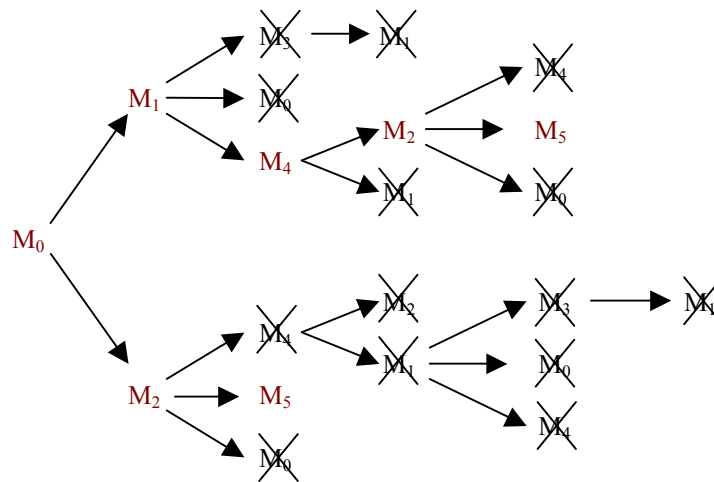


Figura 4.1 - Procedimento para Análise dos Possíveis Caminhos entre M_0 e M_5

Para realizar esta análise, o simulador inicia pela marcação inicial e, verificando a máquina de senha, determina as próximas marcações em um determinado caminho. O caminho é completado quando chega à marcação M_5 (última marcação). Se o caminho não terminar na marcação M_5 , o mesmo é descartado, e se durante a análise, alguma das marcações já existirem no caminho, é excluída do caminho.

Pela Figura 4.1, verificamos que a análise do primeiro caminho iniciou em $M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_3 \rightarrow M_1$. Como M_1 já pertencia ao caminho, esta marca foi eliminada. Retornando a análise da marcação M_3 , verificamos, pela máquina de senha, que ela não leva à outra marcação, exceto à M_1 , que já foi verificada. Desta forma, M_3 também é eliminada do caminho, que segue a análise na marcação anterior, que é M_1 . Verificamos pela máquina de senha, que M_1 leva também, além

da M_3 , às marcações M_0 e M_4 . Como M_0 já pertence ao caminho, ela é retirada do mesmo. Como a marcação M_4 ainda não pertence ao caminho e ela não é a última, esta marca passa a fazer parte do caminho. Seguindo a análise para a marcação M_4 , verificamos que a mesma origina as marcações M_2 e M_1 . Como M_1 já pertence ao caminho, a análise prossegue em M_2 , que passa a fazer parte do caminho. Analisando a máquina de senha para M_2 , constatamos que ela origina as marcações M_0 , M_4 e M_5 . Como M_0 e M_4 pertencem ao caminho, são desconsideradas, ao contrário de M_5 que passa a fazer parte do caminho. Como M_5 é a última marca na tabela, considera-se que ela representa o nó destino e o primeiro caminho é completado como: $M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_4 \rightarrow M_2 \rightarrow M_5$.

Seguindo a mesma análise, chega-se à formação do segundo caminho existente entre M_0 e M_5 que é composto por: $M_0 \rightarrow M_2 \rightarrow M_5$. Os caminhos resultantes são ilustrados na Figura 4.2.

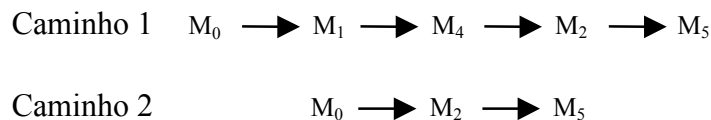


Figura 4.2 - Caminhos Resultantes da Análise Especificada na figura 4.1

A escolha do melhor caminho entre os caminhos possíveis, é feita através da utilização da métrica **Widest-Shortest-Path**: entre os caminhos mais curtos, é escolhido aquele com maior largura de banda disponível. Deste modo, os caminhos começam a ser avaliados em ordem crescente de número de *hops* (marcações). Para o exemplo dado, entre os dois caminhos possíveis, o melhor seria o caminho 2.

Após a escolha do melhor caminho, e verificada a sua capacidade de suportar a conexão, os parâmetros de *buffer* dos lugares e largura de banda das transições são atualizados.

4.3. Módulo 3

Uma das principais características do suporte de comunicações multimídia em redes de alta velocidade é prover Qualidade de Serviço (QoS) para as conexões.

Os requisitos de QoS dos serviços multimídia são tipicamente rigorosos e diferem dependendo da mídia e aplicações.

A função do Controle de Admissão de Conexão (CAC) é determinar se uma conexão pode ser aceita ou não, sem violar os requisitos de QoS das conexões já existentes. Em Redes ATM, a QoS é medida principalmente em relação ao atraso no atendimento da conexão e à perda de células.

O terceiro módulo do simulador é responsável por realizar a função CAC e decidir se determinada conexão, gerada no primeiro módulo e armazenada no calendário, será aceita ou recusada. O terceiro módulo analisa cada conexão, iniciando pela primeira da fila, conforme foi ordenada pelo calendário.

A tomada de decisão é baseada em dois parâmetros: largura de banda e capacidade do buffer, conforme proposto por [CHO97].

(Chong e Li, 1997) propuseram um método para estabelecer conexões com garantia de QoS, baseado no conceito de Curva de Rajada de uma conexão, que pode ser definida como determinística ou probabilística.

Conforme foi proposto em [CHO97] e aplicado ao simulador, cada conexão é definida pelo par (σ, ρ) , onde σ representa o tamanho do buffer e ρ representa a largura de banda (banda efetiva), além de parâmetros como – fonte geradora, serviço enviado, prioridade do serviço enviado.

Na Curva de Rajada Determinística (DBC), o tráfego de cada conexão é visto como uma função de taxa determinística $x(t)$, de duração finita.

Na Curva de Rajada Probabilística (PBC), o tráfego de cada conexão é modelado por um processo aleatório estacionário.

4.3.1. Função CAC (Controle de Admissão de Conexão)

Neste trabalho, para a função CAC foi utilizado o conceito de Curva de Rajada Determinística proposto por (Chong e Li, 1997), levando em consideração a disciplina de serviço RPPS (*Rate Proportional Process Sharing*).

Para analisar se uma determinada conexão pode ser aceita, são analisados os parâmetros de tamanho de buffer e largura de banda da rede, no caminho escolhido. Para um determinado caminho, é verificado se ele suporta, além das conexões já aceitas e que se utilizam de recursos

deste caminho, a nova conexão em análise. Para isso, é considerada a disciplina de atendimento RPPS, que permite a multiplexação estatística de diferentes sessões.

De acordo com (Chong e Li, 1997), uma conexão da sessão i é denotada por:

$$(1) \quad \{(\phi_i^m, \psi_i^m) / m \in R_i\}$$

Onde:

R_i representa um conjunto de *links* na rota (caminho);

ϕ_i^m indica a largura de banda alocada pela conexão i no *link* m ;

ψ_i^m indica o *buffer* alocado pela conexão i no *link* m ;

Seguindo a disciplina RPPS, uma conexão será aceita se, para o caminho escolhido como o melhor, existir *buffer* suficiente nos nós do caminho e a largura de banda atender à seguinte restrição:

$$(\phi_i^m, \psi_i^m) = (\rho_i, \sigma_i),$$

$$(2) \quad \begin{aligned} & s.a \\ & \phi_i^m + \sum_{j \in J^m} \phi_j^m < C^m \\ & \Psi_i^m + \sum_{j \in J^m} \Psi_j^m < B^m \end{aligned}$$

Onde:

C^m indica a largura de banda total no *link* m ;

B^m indica a capacidade do *buffer* no *link* m ;

J^m indica o conjunto de todas as conexões do *link* m ;

ρ_i indica a largura de banda da conexão i ;

σ_i indica o tamanho do *buffer* da conexão i ;

Esta restrição indica que uma conexão só será aceita se a soma da sua largura de banda com a largura de banda das demais conexões que estão ocupando o caminho, for menor que a largura de banda total do *link* e a soma da sua capacidade do *buffer* com a capacidade do *buffer*

das demais conexões que estão ocupando o caminho, for menor que a capacidade total de *buffer* em cada nó.

Após a análise de aceitação ou recusa de conexão, é realizado o atendimento das conexões de acordo com o tempo determinado para cada atividade (armazenamento nos lugares e disparos de transições, que é equivalente à ocupação de *buffer* e utilização do enlace).

4.3.2. Curva de Rajada Probabilística (PBC)

A computação da PBC requer uma modelagem do tráfego e análise de fila. Na modelagem de tráfego estocástico, existem duas funções estatísticas importantes que devem ser medidas:

- $f(x)$, que é o histograma da taxa que descreve as estatísticas do tráfego de primeira ordem.
- $P(w)$, que é o espectro de potência (equivalente à correlação) que captura as estatísticas de tráfego de segunda ordem. As estatísticas de ordem mais alta são ignoradas.

A PBC é essencialmente determinada pelos parâmetros $f(x)$ e $P(w)$ de cada conexão.

Uma vez que os recursos de rede são alocados para cada conexão, é possível limitar a performance fim-a-fim por conexão de acordo com os parâmetros de perda e atraso.

Para conexões com PBC, a Qualidade de Serviço (QoS) é medida pela perda probabilística fim-a-fim limitada, que é causada por estouro de *buffer* na rota, ou por atraso excessivo na chegada ao destino.

A performance por conexão depende do tipo de disciplina de serviço implementado em cada comutador. Entre as disciplinas de serviço propostas temos:

- RPPS (*Rate Proportional Processor Sharing*) – disciplina de serviço que permite a multiplexação estatística de diferentes conexões.
- FRPS (*Fixed Rate Processor Sharing*) – disciplina de serviço que aloca uma largura de banda fixa para a transmissão de cada conexão.

A PBC permite uma garantia probabilística na perda e atraso fim-a-fim.

Um esquema de controle de admissão de conexão (CAC) pode ser implementando baseado em PBC da seguinte maneira:

- desde que as funções estatísticas $f(x)$ e $P(w)$ puderem ser coletadas a partir do fluxo de tráfego, a PBC de cada conexão pode ser computada e armazenada pelo gerenciador de tráfego da rede.
- quando uma nova conexão chega, a função CAC examina a PBC correspondente e identifica o conjunto Z admissível de pares (σ, ρ) que satisfaçam as restrições de QoS da conexão. O conceito de conjunto admissível introduz uma grande flexibilidade na alocação de recursos de buffer e largura de banda para a conexão.

A QoS da conexão é garantida uma vez que a conexão é aceita. A conexão é recusada se nenhum par (σ, ρ) no conjunto Z puder ser assegurado pela rede.

Uma vantagem do controle de admissão de conexão (CAC) baseado em PBC é que ela permite naturalmente o compartilhamento de *buffer* entre diferentes conexões. Ao invés de alocar um *buffer* separado para cada conexão no *link*, todas as conexões podem estaticamente compartilhar um *buffer* comum.

4.4. Módulo 4

O quarto módulo do simulador é responsável por gerar estatísticas de atraso e taxa de células perdidas por conexão, que são os parâmetros de qualidade de serviço utilizados para avaliar o desempenho da rede. Juntamente com estes parâmetros, é obtida também a porcentagem de conexões aceitas pela análise da função CAC, que é baseada na Curva de Rajada Determinística.

4.5. Interação entre os Módulos

A interação entre os módulos pode ser observada através da figura 4.3.

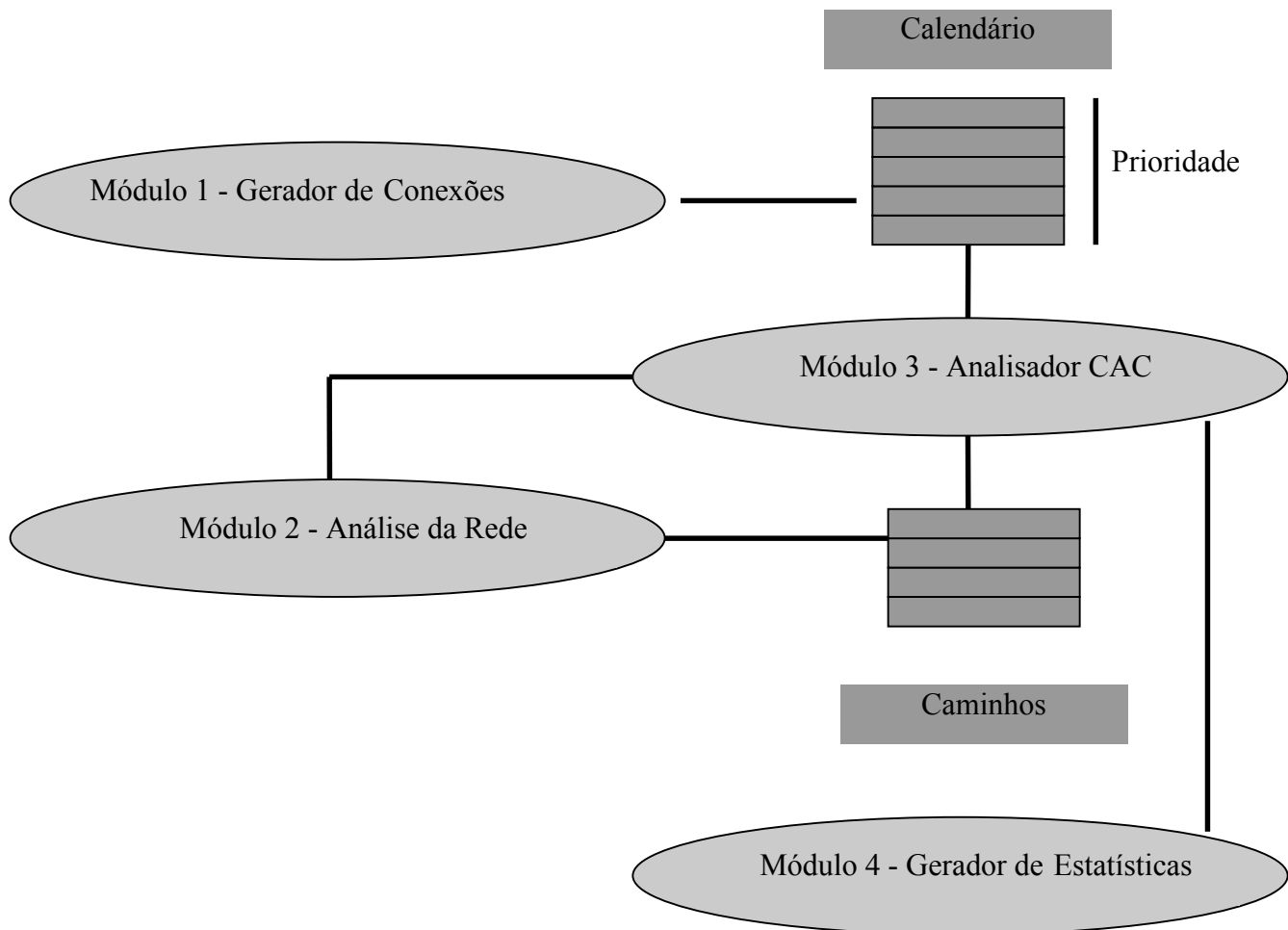


Figura 4.3 - Interação entre os Módulos do Simulador

O primeiro módulo gera conexões em tempos aleatórios durante o tempo total de simulação. As conexões geradas são armazenadas no calendário, que as ordena de acordo com o tempo de chegada e com a prioridade do serviço transmitido pela fonte.

O terceiro módulo (analisador CAC) analisa, para cada conexão armazenada no calendário, se a mesma poderá ser aceita ou não. O módulo três inicialmente invoca o segundo módulo para cada conexão.

O segundo módulo (analisador da rede) faz a manipulação interna da rede, para uma dada taxa de transmissão de células, através do cenário inserido pelo usuário e, construindo a tabela de

marcação e a máquina de senha, retorna ao módulo três os possíveis caminhos para o encaminhamento das células de um nó origem a um nó destino.

Após o retorno do módulo dois, o terceiro módulo analisa, para cada caminho retornado e em ordem crescente de número de nós no caminho, se poderá atender os requisitos de QoS da conexão, sem violar as demais conexões já aceitas, através da função de controle de admissão de conexão, baseada no conceito de Curva de Rajada Determinística [CHO97]. Realizada a análise da função CAC, se for encontrado algum caminho pelo qual as células da conexão poderão ser encaminhadas, o atendimento da conexão é temporizado e realizado.

Por fim, o quarto módulo (Gerador de Estatísticas) retorna as estatísticas com relação ao atraso sofrido pelas conexões, a perda de células, a porcentagem de conexões aceitas e os períodos T_{ON} e T_{OFF} de cada fonte.

4.6. Conclusão

O objetivo deste capítulo foi o de apresentar o simulador, implementado na linguagem *CBuilder 4.0*, e que é uma ferramenta que tem um intuito de dimensionar valores de capacidade de *buffer* nos nós da rede e de largura de banda nos enlaces da rede de forma a atender os requisitos de QoS (Qualidade de Serviço) das conexões e tem o objetivo de efetuar a análise de desempenho aplicando a função CAC proposta.

Foram apresentados os quatro módulos que compreendem o simulador. O primeiro módulo (gerador de conexões) é responsável por gerar conexões em tempos aleatórios no decorrer do tempo total de simulação. Estas conexões são armazenadas em uma estrutura chamada calendário. O segundo módulo (analisador da rede), implementado com os conceito de Redes de Petri, faz a manipulação interna da rede e retorna possíveis caminhos a serem utilizados para o encaminhamento das células entre um nó origem à um nó destino. O terceiro módulo (analisador CAC) analisa cada conexão armazenada no calendário para verificar se existe algum caminho que possa satisfazer os requisitos da conexão e se, então, a conexão pode ser aceita ou não. O quarto módulo (gerador de estatísticas) gera estatísticas como: células perdidas, atraso no atendimento da conexão, taxas “ON” e “OFF” das fontes e porcentagem de conexões aceitas.

Por último, foi ressaltada a interação entre os quatro módulos.

5. Estudo de Caso

5.1. Primeiro Estudo de Caso

Após o término da implementação do simulador, foram realizados vários testes. Um dos testes realizados é o estudo de caso que será apresentado a seguir.

O cenário, tratado neste estudo de caso, é composto por 5 nós e 10 transições, conforme mostrado na figura 5.1.

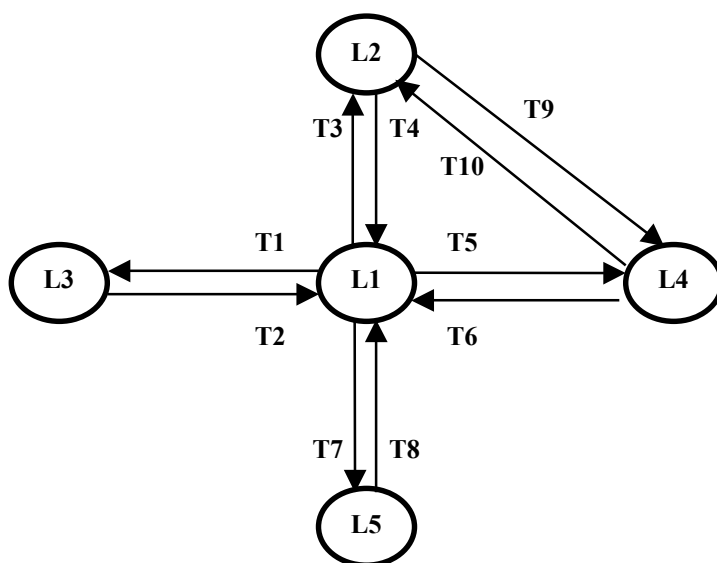


Figura 5.1 - Cenário do Primeiro Estudo de Caso

Para realizar a simulação, deve-se fornecer como dado de entrada as matrizes de incidência direta e reversa correspondentes ao cenário. As matrizes são apresentadas nas tabelas 5.1 e 5.2. Estas matrizes são inseridas através de um arquivo “.txt”, que será utilizado durante toda a simulação.

Tabela 5.1 - Matriz de Incidência Direta do Cenário

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Tabela 5.2 - Matriz de Incidência Reversa do Cenário

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Foram realizados dois testes principais. O primeiro teste deu ênfase à variação da largura de banda dos enlaces e o segundo à variação de tamanho de buffer dos nós. O objetivo dos dois testes é analisar os requisitos de QoS, atraso nas conexões e perda de células, como forma de verificar o desempenho da rede e dimensionar valores para a largura de banda nos enlaces da rede e para o tamanho do buffer nos nós da rede. Outro objetivo é analisar as estatísticas geradas com relação a porcentagem de conexões aceitas e com relação as taxas dos períodos ativo (ON) e de silêncio (OFF) das fontes aplicadas na simulação.

5.1.1. Teste 1

No primeiro teste, no qual é dado enfoque à variação de largura de banda dos enlaces, foram utilizados, durante toda a simulação, os valores apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores de Simulação do Teste 1

Tempo de Simulação (unidade discreta de tempo-u.d.t.)	100
Tempo de Conexão (contrato- u.d.t.)	15
Número de Conexões Geradas Aleatoriamente	130
Tamanho do Buffer (células)	20

Os valores da tabela 5.3 são inseridos nos campos do programa conforme é apresentado na figura 5.2. A figura representa a interface do programa com o usuário.

O campo “tempo de simulação”, apresentado na figura 5.2, representa o tempo total para a execução da simulação. O campo “tempo de conexão” representa o tempo contratado para o atendimento das conexões. O campo “quant. conexões” representa o número de conexões que serão geradas aleatoriamente no decorrer do tempo de simulação e que serão armazenadas no calendário. O campo “tamanho buffer” representa o tamanho do buffer que será adotado para cada nó da rede e o campo “largura de banda” representa a banda efetiva que será adotada para cada enlace da rede.

No campo “status” é apresentada a situação na qual a simulação se encontra e entre estas situações temos: o preenchimento da tabela de marcação, o preenchimento da máquina de senha, a resolução dos caminhos, a realização da função CAC, o atendimento da conexão e a geração do arquivo de estatísticas. Este campo apresenta cada atividade realizada pelos quatro módulos do simulador.

As estatísticas são apresentadas no último campo, conforme é ilustrado pela figura 5.2, e são gravadas em um arquivo “est.txt”.

O botão “calcular” dá início à simulação e o botão “deletar” apaga as estatísticas geradas.

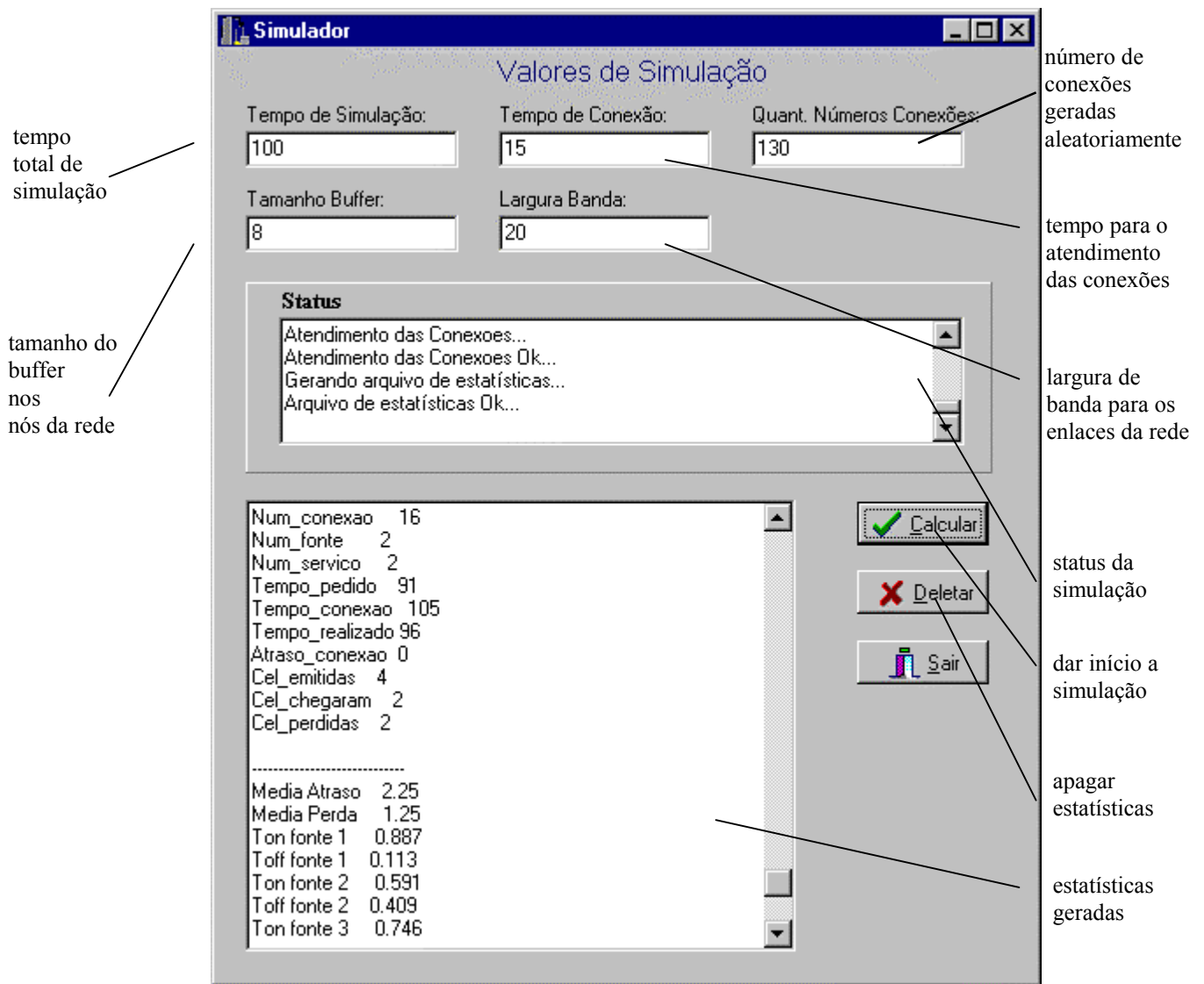


Figura 5.2 - Interface do Programa de Simulação

Na tabela 5.4 são apresentados os valores obtidos na simulação – Largura de Banda x Atraso. As estatísticas capturadas foram: média de atraso das conexões, porcentagem de conexões aceitas e o número de conexões aceitas e recusadas.

Tabela 5.4 - Resultados da Simulação: Largura de Banda x Atraso

Largura de Banda	Atraso (média)	Porcentagem de Conexões Aceitas	Conexões Aceitas	Conexões Recusadas
5	0,78	50%	9	9
8	1,06	58%	10	7
10	1,56	93%	15	1
13	1,87	100%	15	0
15	1,8	100%	15	0
20	1,8	100%	15	0
25	1,78	94%	17	1
30	1,88	100%	17	0
35	1,94	100%	16	0
40	2	100%	17	0
45	2,11	94%	17	1
50	2	100%	16	0
55	1,94	100%	18	0
58	2,17	100%	18	0
60	2,69	100%	16	0

O gráfico correspondente às estatísticas obtidas é apresentado na figura 5.3.

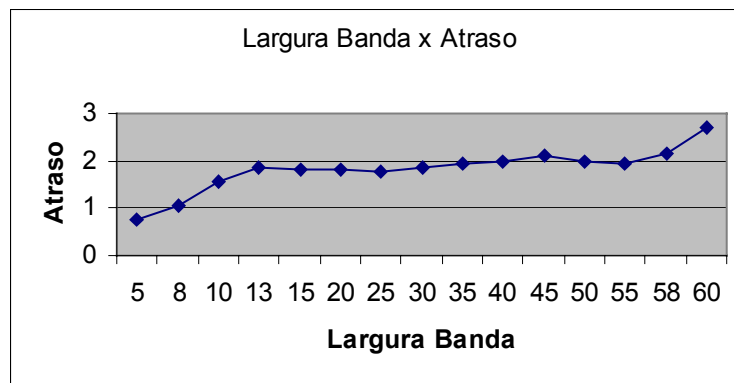


Figura 5.3 - Gráfico "Largura de Banda x Atraso"

Na tabela 5.5 são apresentados os valores obtidos na simulação: Largura de Banda x Perda de Células. As estatísticas capturadas foram: média de células perdidas, porcentagem de conexões aceitas e o número de conexões aceitas e recusadas.

O atraso obtido, a cada variação da largura de banda e apresentado na tabela 5.4, é o valor médio de todo o atraso obtido no decorrer da simulação para um determinado valor adotado em

cada enlace da rede. A perda de células obtida, a cada variação da largura de banda e apresentada na tabela 5.5, é o valor médio de todas as células perdidas no decorrer da simulação executada para um determinado valor adotado em cada enlace da rede.

Tabela 5.5 - Resultados da Simulação: Largura de Banda x Células Perdidas

Largura de Banda	Células Perdidas (média)	Porcentagem de Conexões Aceitas	Conexões Aceitas	Conexões Recusadas
5	4,22	50%	9	9
8	3,59	58%	10	7
10	1,94	93%	15	1
13	1,6	100%	15	0
15	1,4	100%	15	0
20	1,53	100%	15	0
25	1,28	94%	17	1
30	1,47	100%	17	0
35	1,31	100%	16	0
40	1,35	100%	17	0
45	1,39	94%	17	1
50	1,31	100%	16	0
55	1,22	100%	18	0
58	1,33	100%	16	0
60	1,38	100%	16	0

O gráfico correspondente às estatísticas obtidas é apresentado na figura 5.4.

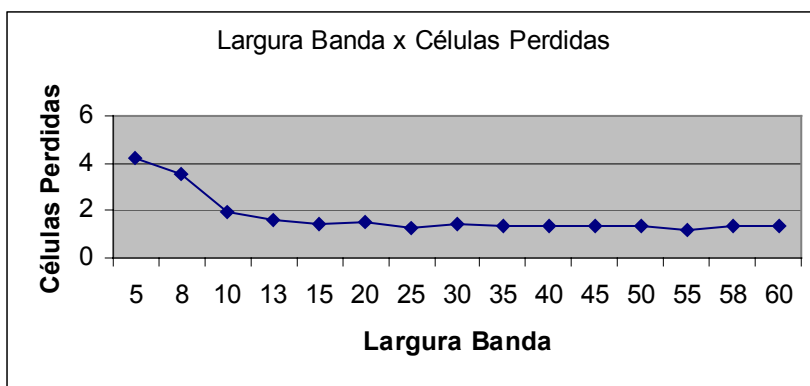


Figura 5.4 - Gráfico "Largura de Banda x Células Perdidas"

A partir das estatísticas e dos gráficos obtidos, podemos verificar que, com o aumento da largura de banda, ocorre a diminuição da perda de células e um aumento no atraso. Este aumento no atraso deve-se ao fato de que, por conexão, um maior número de células estão sendo aceitas, em média, e, portanto, levam mais tempo para serem atendidas, ocasionando um crescimento no atraso para o atendimento destas conexões.

O aumento no atraso também é proveniente do tipo de serviço transmitido pela fonte. Quando duas fontes estão transmitindo serviços diferentes, com prioridades diferentes, o atendimento é realizado, primeiramente, para aquela que está transmitindo serviço de prioridade mais alta. Como o atendimento é ordenado pelo calendário, conforme o tempo de pedido de conexão e conforme a prioridade do serviço, pode ocorrer que uma conexão que esteja transmitindo vídeo, mesmo com tempo de pedido de conexão inferior ao de outra conexão que esteja transmitindo dados ou áudio, tenha um atraso maior no seu atendimento devido à prioridade menor em relação à dos serviços de dados e áudio.

Na tabela 5.6 podemos verificar os valores obtidos em relação ao atraso médio e à perda de células quando foi aplicado o valor 5 para a largura de banda em cada enlace da rede.

Tabela 5.6 - Dados obtidos na Simulação quando “largura de banda = 5”

Número da Conexão	Tempo para atendimento Conexao	Tempo Realizado	Atraso	Células Emitidas	Células Perdidas
1	16	8	0	6	4
2	17	19	2	8	4
3	24	14	0	6	5
4	33	37	4	10	5
5	37	37	0	8	5
6	42	41	0	10	5
7	49	50	1	8	6
8	54	53	0	5	3
9	58	47	0	4	3
10	65	69	4	8	1
11	73	74	1	5	3
12	75	68	0	8	5
13	82	84	2	10	5
14	89	78	0	3	2
15	91	90	0	8	4
16	99	94	0	11	7
17	105	95	0	5	3
18	108	99	0	8	6
Total = 131				Total = 76	
Atraso Médio = 0,78		Média de Células Perdidas = 4,22			

Na tabela 5.7 podemos verificar os valores obtidos em relação ao atraso médio e a perda de células quando foi aplicado o valor 25 para a largura de banda em cada enlace da rede.

Tabela 5.7 - Dados obtidos na Simulação quando “largura de banda = 25”

Número da Conexão	Tempo para atendimento Conexao	Tempo Realizado	Atraso	Células Emitidas	Células Perdidas
1	16	21	5	9	1
2	21	21	0	6	1
3	24	26	2	9	2
4	32	35	3	10	1
5	39	40	1	11	2
6	41	44	3	9	1
7	48	50	2	15	2
8	59	60	1	4	1
9	64	68	4	8	1
10	65	66	1	10	2
11	76	77	1	9	2
12	81	82	1	9	1
13	84	89	5	8	1
14	95	97	2	6	1
15	97	97	0	5	1
16	100	101	1	14	1
17	112	101	0	2	1
18	113	0	0	1	1
				Total = 145	Total = 23
Atraso Médio = 1,78			Média de Células Perdidas = 1,28		

Para a representação dos gráficos das figuras 5.3 e 5.4, foi realizada a simulação variando a largura de banda entre os valores 5 e 60. Foi obtida, para cada um desses valores, uma tabela semelhante às tabelas 5.6 e 5.7. Os resultados obtidos são: o número da conexão que está sendo tratada, o tempo necessário para o atendimento da conexão, o tempo gasto para o atendimento da conexão, o atraso gerado no atendimento da conexão, o número de células emitidas e o número de células perdidas durante o atendimento das conexões. Com os resultados do atraso e de células perdidas, foi possível estabelecer o atraso médio e a média de células perdidas.

Com relação ao módulo 1 do simulador, que trata das gerações das conexões ON-OFF, podemos verificar, através da tabela 5.8, as taxas de surto e de silêncio das fontes 1, 2 e 3 das conexões do Teste 1.

Tabela 5.8 - Taxas de Surto e Silêncio das Fontes ON-OFF

Largura de Banda	Ton1	Toff1	Ton2	Toff2	Ton3	Toff3
5	0,875	0,125	0,823	0,177	0,557	0,443
8	0,755	0,245	0,48	0,52	0,809	0,191
10	0,745	0,255	0,5	0,5	0,6	0,4
13	0,825	0,175	0,598	0,402	0,548	0,452
15	0,768	0,232	0,683	0,317	0,478	0,522
20	0,711	0,219	0,558	0,442	0,762	0,238
25	0,854	0,146	0,753	0,247	0,685	0,315
30	0,835	0,165	0,622	0,378	0,621	0,379
35	0,896	0,104	0,585	0,415	0,762	0,238
40	0,763	0,237	0,758	0,242	0,612	0,338
45	0,895	0,105	0,709	0,291	0,767	0,233
50	0,867	0,133	0,638	0,362	0,586	0,414
55	0,848	0,152	0,76	0,24	0,613	0,387
58	0,878	0,122	0,548	0,452	0,629	0,371
60	0,856	0,144	0,807	0,193	0,635	0,365

Pela tabela 5.8, verificamos que, quando a largura de banda é igual a 5, a taxa de surto da fonte 1 é 0,875 e a taxa de silêncio é 0,125. Estas taxas referem-se ao tempo em que a fonte permanece ativa e inativa.

5.1.2. Teste 2

No segundo teste, no qual é dado enfoque à variação de tamanho de buffer dos nós, foram utilizados, durante toda a simulação, os valores apresentados na tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Valores de Simulação do Teste 2

Tempo de Simulação (u.d.t.)	100
Tempo de Conexão (contrato – u.d.t.)	15
Número de Conexões Geradas Aleatoriamente	130
Largura de Banda (células)	20

Na tabela 5.10 são apresentados os valores obtidos na simulação – Tamanho de Buffer x Atraso. As estatísticas capturadas são: média de atraso das conexões, porcentagem de conexões aceitas e o número de conexões aceitas e recusadas.

Tabela 5.10 - Resultados da Simulação: Tamanho de Buffer x Atraso

Tamanho do Buffer	Atraso	Porcentagem de Conexões Aceitas	Conexões Aceitas	Conexões Recusadas
5	1,35	76%	13	4
8	1,56	100%	16	0
10	1,44	100%	16	0
13	1,59	100%	17	0
15	1,56	100%	18	0
20	1,5	100%	16	0
25	2,12	93%	15	1
30	2,12	94%	16	1
35	2	93%	14	1
40	2,19	100%	16	0
45	2	100%	18	0
50	2	100%	17	0
55	2,12	100%	17	0
58	1,94	100%	16	0
60	2,24	100%	17	0

O gráfico correspondente às estatísticas obtidas é apresentado na figura 5.5.

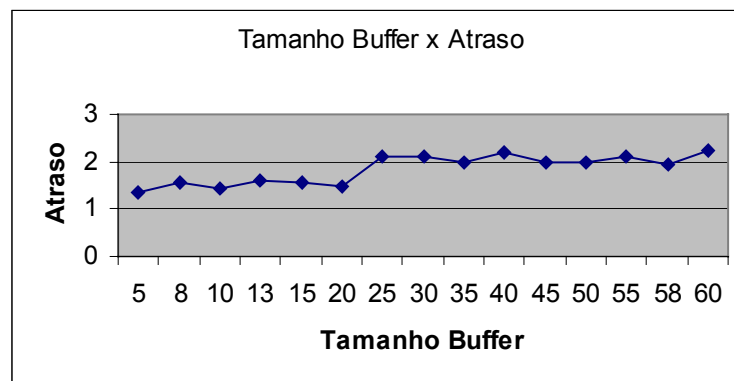


Figura 5.5 - Gráfico “Tamanho de Buffer x Atraso”

Na tabela 5.11 são apresentados os valores obtidos na simulação – Tamanho de Buffer x Perda de Células. As estatísticas capturadas são: média de células perdidas, porcentagem de conexões aceitas e o número de conexões aceitas e recusadas.

Tabela 5.11 - Resultados da Simulação: Tamanho de Buffer x Células Perdidas

Tamanho do Buffer	Células Perdidas	Porcentagem de Conexões Aceitas	Conexões Aceitas	Conexões Recusadas
5	4,47	76%	13	4
8	1,19	100%	16	0
10	1,31	100%	16	0
13	1,18	100%	17	0
15	1,28	100%	18	0
20	1,31	100%	16	0
25	1,12	93%	15	1
30	1,35	94%	16	1
35	1,44	93%	14	1
40	1,56	100%	16	0
45	1,39	100%	18	0
50	1,65	100%	17	0
55	1,35	100%	17	0
58	1,44	100%	16	0
60	1,41	100%	17	0

O gráfico correspondente às estatísticas obtidas é apresentado na figura 5.6.

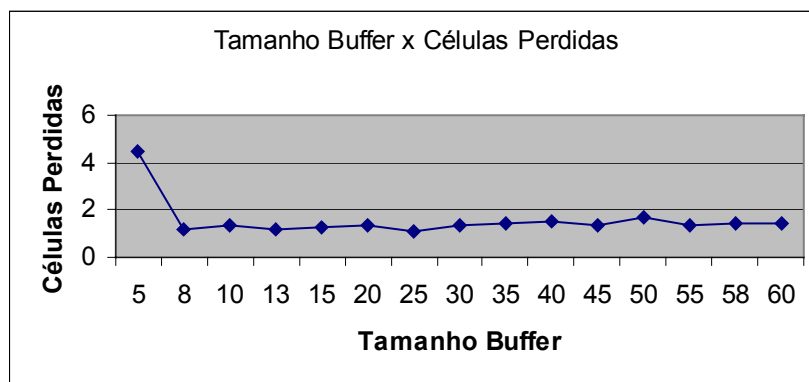


Figura 5.6 - Gráfico “Tamanho de Buffer x Células Perdidas”

O atraso obtido, a cada variação do tamanho do buffer e apresentado na tabela 5.10, é o valor médio de todo o atraso obtido no decorrer da simulação para um determinado valor adotado em cada nó da rede. A perda de células obtida, a cada variação do tamanho do buffer e apresentada na tabela 5.11, é o valor médio de todas as células perdidas no decorrer da simulação executada para um determinado valor adotado em cada nó da rede.

Com relação ao módulo 1 do simulador, que trata das gerações das conexões ON-OFF, podemos verificar, através da tabela 5.12, as taxas de surto e de silêncio das fontes 1, 2 e 3 das conexões do Teste 2.

Tabela 5.12 - Taxas de Surto e Silêncio das Fontes ON-OFF

Tamanho Buffer	Ton1	Toff1	Ton2	Toff2	Ton3	Toff3
5	0,877	0,123	0,705	0,296	0,656	0,344
8	0,857	0,143	0,538	0,461	0,802	0,198
10	0,821	0,179	0,583	0,417	0,531	0,469
13	0,774	0,226	0,753	0,247	0,615	0,385
15	0,863	0,134	0,604	0,396	0,632	0,368
20	0,827	0,173	0,463	0,537	0,542	0,458
25	0,875	0,125	0,526	0,474	0,611	0,389
30	0,915	0,085	0,571	0,429	0,577	0,423
35	0,894	0,106	0,625	0,375	0,446	0,554
40	0,806	0,194	0,583	0,417	0,707	0,293
45	0,667	0,333	0,768	0,232	0,713	0,287
50	0,652	0,348	0,771	0,229	0,775	0,245
55	0,760	0,240	0,620	0,380	0,707	0,293
58	0,878	0,122	0,585	0,415	0,594	0,406
60	0,865	0,135	0,554	0,446	0,677	0,323

O módulo 3 do simulador é responsável por analisar se determinada conexão será aceita ou não. Nas tabelas, que apresentam os resultados das simulações, podemos verificar a porcentagem de conexões aceitas.

A partir das estatísticas e dos gráficos obtidos, podemos verificar que, com o aumento do tamanho do buffer, ocorre a diminuição da perda de células e um aumento no atraso. Este aumento no atraso deve-se ao fato de que, por conexão, um maior número de células estão sendo aceitas em média e, portanto, levam mais tempo para serem atendidas.

5.1.3. Dimensionamento da Largura de Banda e Tamanho de Buffer

Com o intuito de verificar qual o melhor valor da largura de banda e do tamanho do buffer para ser aplicado aos enlaces e nós da rede, analisamos os resultados obtidos para o atraso médio e para a média de células perdidas com relação a variação do tamanho do buffer e da largura de banda. A tabela 5.13 apresenta os resultados do atraso e perda de células variando a largura de banda. Segundo a figura 5.7, pode-se concluir que um bom valor para a largura de banda nos enlaces da rede seria em torno de 13. Com este valor é possível obter um baixo atraso e uma baixa perda de células no atendimento das conexões.

Tabela 5.13 - Resultados de Atraso e Células Perdidas variando a Largura de Banda

Largura de Banda	Atraso	Células Perdidas
5	0,78	4,22
8	1,06	3,59
10	1,56	1,94
13	1,87	1,6
15	1,8	1,4
20	1,8	1,53
25	1,78	1,28
30	1,88	1,47
35	1,94	1,31
40	2	1,35
45	2,11	1,39
50	2	1,31
55	1,94	1,22
58	2,17	1,33
60	2,69	1,38

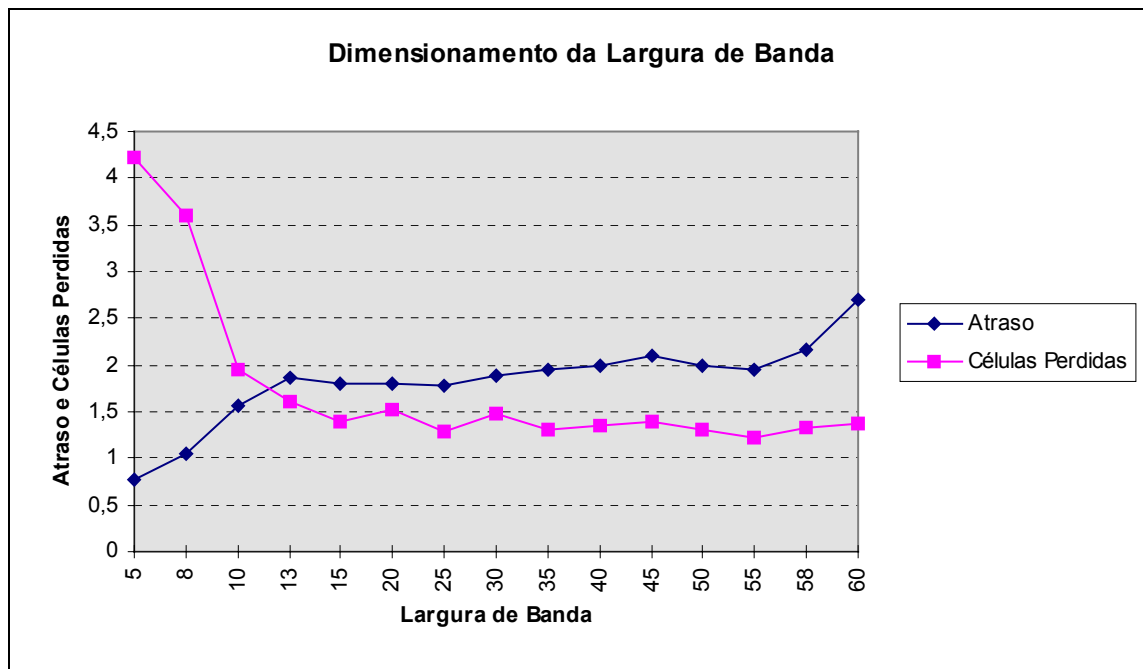


Figura 5.7 - Dimensionamento da Largura de Banda

A tabela 5.14 apresenta os resultados do atraso e perda de células variando o tamanho do buffer. Segundo a figura 5.8, pode-se concluir que um bom valor para o tamanho do buffer, nos nós da rede, seria em torno dos valores entre 8 e 20. Com estes valores é possível obter um baixo atraso e uma baixa perda de células no atendimento das conexões.

Tabela 5.14 - Resultados de Atraso e Células Perdidas variando o Tamanho do Buffer

Tamanho do Buffer	Atraso	Células Perdidas
5	1,35	4,47
8	1,56	1,19
10	1,44	1,31
13	1,59	1,18
15	1,56	1,28
20	1,5	1,31
25	2,12	1,12
30	2,12	1,35
35	2	1,44
40	2,19	1,56
45	2	1,39
50	2	1,65
55	2,12	1,35
58	1,94	1,44
60	2,24	1,41

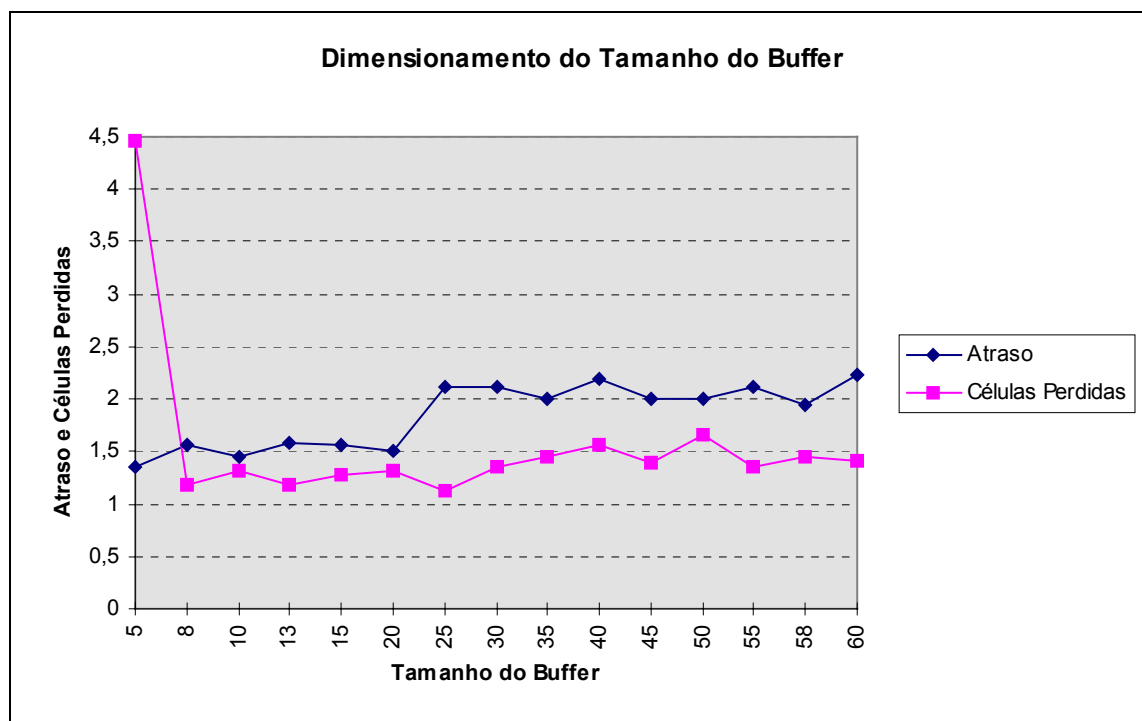


Figura 5.8 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer

Na tabela 5.15 podemos observar os resultados obtidos na simulação, considerando como valores de largura de banda igual a 13 e de tamanho do buffer igual a 10. Nesta simulação foi obtido como atraso médio 1,28 e como média de células perdidas 1,39.

Tabela 5.15 - Dados obtidos na simulação para “largura de banda = 13” e “tamanho do buffer= 10”

Número da Conexão	Tempo para atendimento Conexão	Tempo Realizado	Atraso	Células Emitidas	Células Perdidas
1	17	20	3	7	2
2	17	14	0	4	1
3	21	23	2	10	2
4	35	24	0	2	1
5	37	37	0	10	2
6	42	38	0	3	1
7	51	54	3	7	2
8	53	54	1	10	1
9	58	57	0	5	1
10	69	72	3	12	1
11	73	69	0	5	1
12	76	80	4	8	1
13	86	91	5	14	1
14	90	92	2	5	1
15	98	97	0	7	2
16	102	102	0	8	1
17	108	100	0	6	2
18	114	0	0	2	2
				Total = 125	Total = 25
Atraso Médio = 1,28			Média de Células Perdidas = 1,39		

5.1.4. Análise de Tamanho do Buffer por Nós

Outro teste realizado foi a simulação variando o tamanho do buffer em cada nó da rede separadamente com o objetivo de analisar os resultados do atraso médio e da média de células perdidas.

5.1.4.1. Análise do Nó 1

Através da tabela 5.16 podemos observar os resultados obtidos no atraso médio e na média de células perdidas com a variação do tamanho do buffer no nó 1 da rede. Para a simulação, foi assumido o valor 20 para o tamanho do buffer nos demais nós da rede. Os outros dados da simulação considerados foram os mesmos das outras simulações (tempo de simulação = 100, número de conexões geradas aleatoriamente = 130 e tempo de conexão = 15).

Tabela 5.16 - Resultados obtidos na Simulação variando o Tamanho do Buffer no Nó 1 da Rede

Tamanho do Buffer (Nó 1)	Atraso	Células Perdidas
5	1,38	1,44
8	1,5	1,31
10	1,38	1,31
13	1,31	1,31
15	1,47	1,29
20	1,35	1,24
25	1,27	1,27
30	1,31	1,25
35	1,38	1,19
40	1,4	1,2
45	1,75	1,19
50	1,88	1,18
55	1,8	1,13
58	2,06	1,12
60	2	1,13

Segundo a figura 5.9, pode-se concluir que um bom valor para o tamanho do buffer, no nó 1 da rede, seria entre 13 e 25. Com estes valores é possível obter um baixo atraso e uma baixa perda de células no atendimento das conexões.

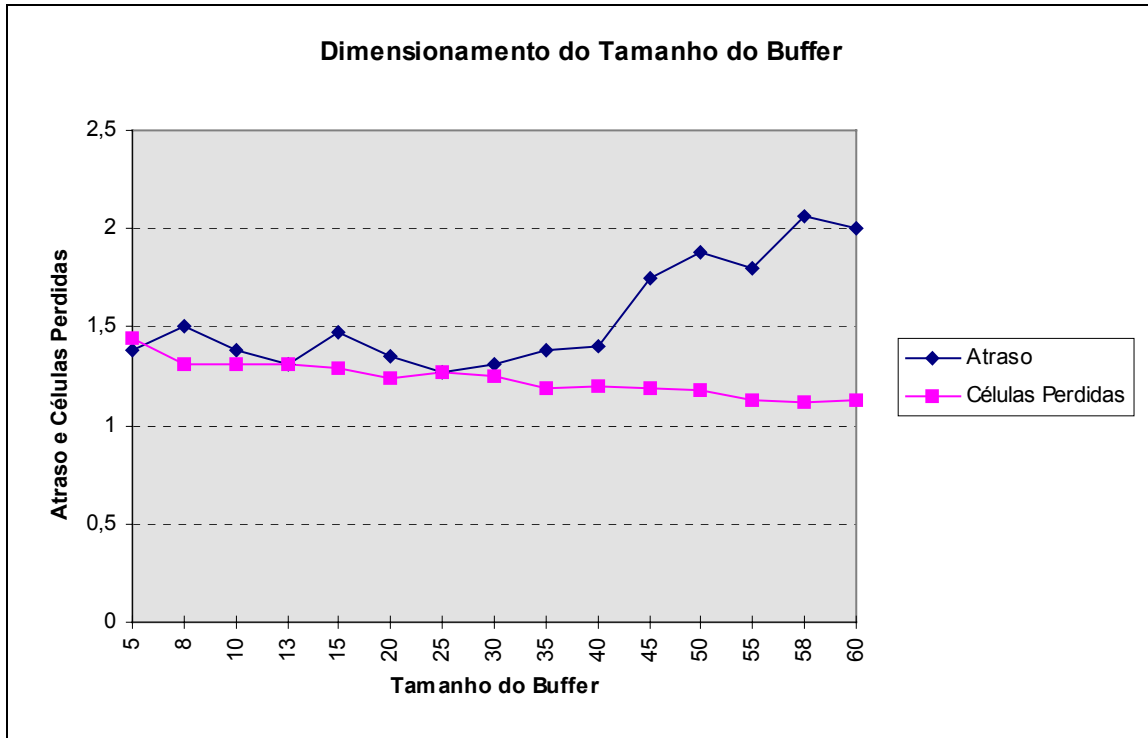


Figura 5.9 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer no Nó 1

5.1.4.2. Análise do Nó 2

Através da tabela 5.17 podemos observar os resultados obtidos no atraso médio e na média de células perdidas com a variação do tamanho do buffer no nó 2 da rede. Para a simulação, foi assumido o valor 20 para o tamanho do buffer nos demais nós da rede. Os outros dados da simulação considerados foram os mesmos das outras simulações (tempo de simulação = 100, número de conexões geradas aleatoriamente = 130 e tempo de conexão = 15).

Tabela 5.17 - Resultados obtidos na Simulação variando o Tamanho do Buffer no Nó 2 da Rede

Tamanho do Buffer (Nó 2)	Atraso	Células Perdidas
5	1,69	1,44
8	1,44	1,37
10	1,35	1,35
13	1,53	1,33
15	1,65	1,29
20	1,67	1,27
25	1,64	1,29
30	1,6	1,27
35	1,67	1,28
40	2	1,27
45	2	1,27
50	2,12	1,29
55	2,12	1,29
58	2	1,29
60	2	1,23

Segundo a figura 5.10, pode-se concluir que um bom valor para o tamanho do buffer, no nó 2 da rede, seria 10.

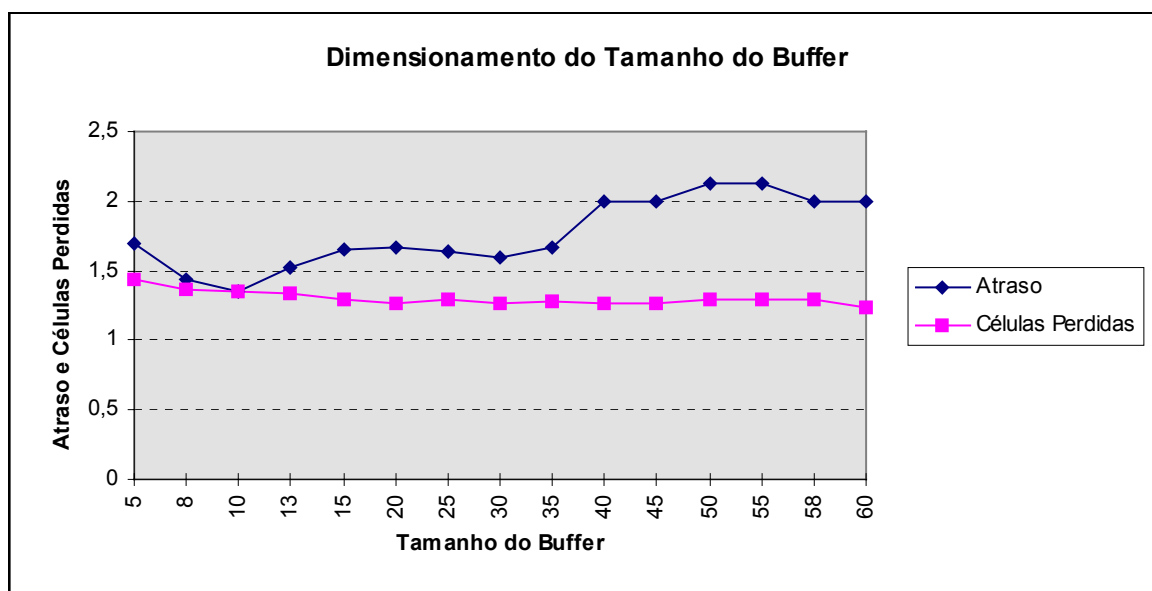


Figura 5.10 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer no Nó 2

5.1.4.3. Análise do Nó 3

Através da tabela 5.18 podemos observar os resultados obtidos no atraso médio e na média de células perdidas com a variação do tamanho do buffer no nó 3 da rede. Para a simulação, foi assumido o valor 20 para o tamanho do buffer nos demais nós da rede. Os outros dados da simulação considerados foram os mesmos das outras simulações (tempo de simulação =100, número de conexões geradas aleatoriamente = 130 e tempo de conexão = 15).

Tabela 5.18 - Resultados obtidos na Simulação variando o Tamanho do Buffer no Nó 3 da Rede

Tamanho do Buffer (Nó 3)	Atraso	Células Perdidas
5	1,19	1,44
8	1,7	1,47
10	1,75	1,38
13	1,75	1,31
15	1,81	1,31
20	1,76	1,29
25	1,75	1,25
30	1,94	1,24
35	1,94	1,24
40	2,06	1,25
45	2,06	1,24
50	2,06	1,25
55	2,06	1,24
58	2,12	1,18
60	2,12	1,06

Segundo a figura 5.11, pode-se concluir que um bom valor para o tamanho do buffer, no nó 3 da rede, seria 8. Com este valor é possível obter uma baixo atraso e uma baixa perda de células no atendimento das conexões.

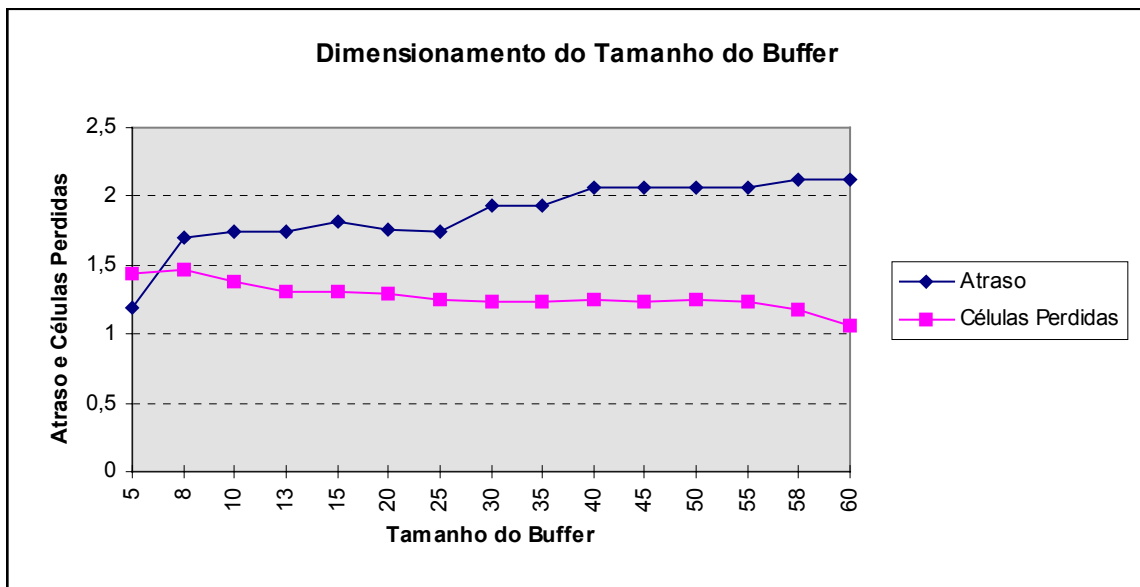


Figura 5.11 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer no Nó 3

5.1.4.4. Análise do Nó 4

Através da tabela 5.19 podemos observar os resultados obtidos no atraso médio e na média de células perdidas com a variação do tamanho do buffer no nó 4 da rede. Para a simulação, foi assumido o valor 20 para o tamanho do buffer nos demais nós da rede. Os outros dados da simulação considerados foram os mesmos das outras simulações (tempo de simulação = 100, número de conexões geradas aleatoriamente = 130 e tempo de conexão = 15).

Tabela 5.19 - Resultados obtidos na Simulação variando o Tamanho do Buffer no Nó 4 da Rede

Tamanho do Buffer (Nó 4)	Atraso	Células Perdidas
5	1,38	1,56
8	1,33	1,47
10	1,47	1,35
13	1,5	1,31
15	1,53	1,33
20	1,56	1,31
25	1,82	1,35
30	1,82	1,29
35	1,88	1,29
40	1,88	1,24
45	1,94	1,29
50	1,94	1,31
55	2,19	1,19
58	2,2	1,2
60	2,29	1,24

Segundo a figura 5.12, pode-se concluir que um bom valor para o tamanho do buffer, no nó 4 da rede, seria 10. Com este valor é possível obter um atraso e uma perda de células dentro do aceitável.

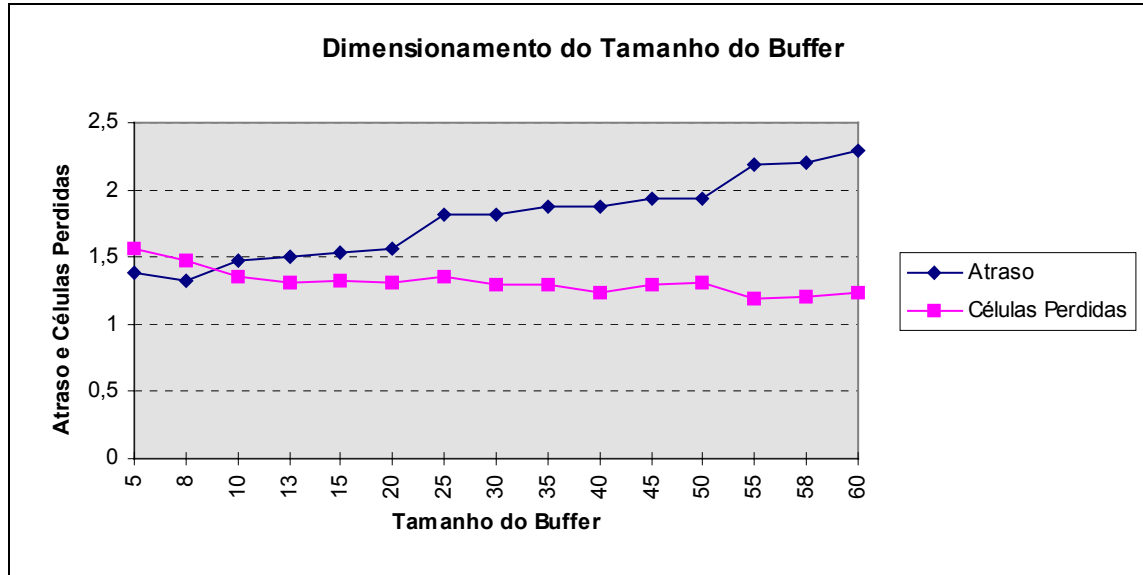


Figura 5.12 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer no Nó 4

5.1.4.5. Análise do Nó 5

Através da tabela 5.20 podemos observar os resultados obtidos no atraso médio e na média de células perdidas com a variação do tamanho do buffer no nó 5 da rede. Para a simulação, foi assumido o valor 20 para o tamanho do buffer nos demais nós da rede. Os outros dados da simulação considerados foram os mesmos das outras simulações (tempo de simulação = 100, número de conexões geradas aleatoriamente = 130 e tempo de conexão = 15).

Tabela 5.20 - Resultados obtidos na Simulação variando o Tamanho do Buffer no Nó 5 da Rede

Tamanho do Buffer (Nó 5)	Atraso	Células Perdidas
5	1,59	1,65
8	1,65	1,53
10	1,69	1,5
13	1,71	1,47
15	1,81	1,5
20	1,94	1,35
25	2	1,33
30	2,06	1,22
35	1,94	1,18
40	2	1,16
45	2,12	1,18
50	2,24	1,18
55	2,24	1,12
58	2,31	1,13
60	2,29	1,12

Segundo a figura 5.13, pode-se concluir que um bom valor para o tamanho do buffer, no nó 5 da rede, seria 8.

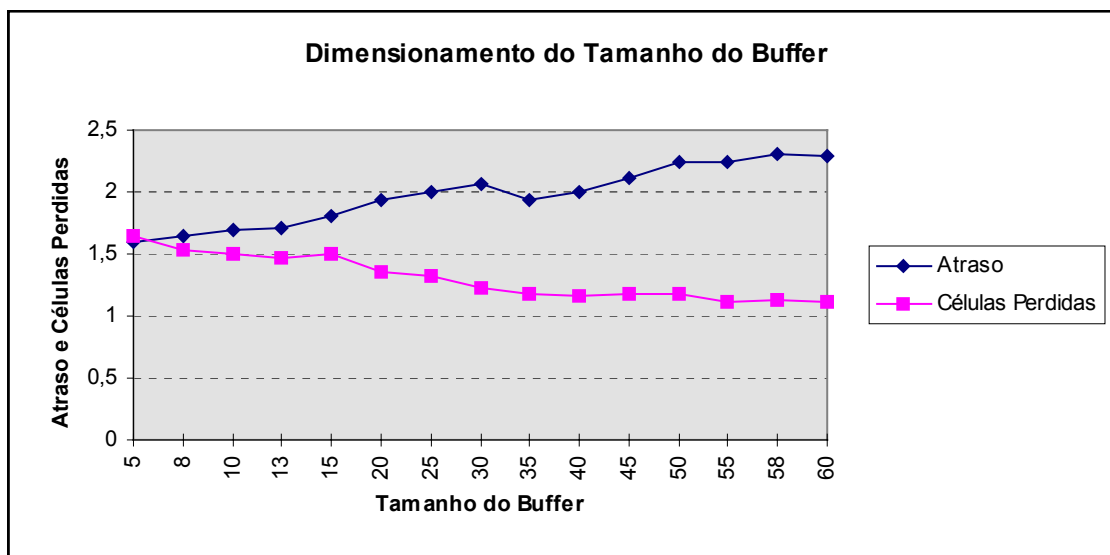


Figura 5.13 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer no Nó 5

Na tabela 5.22 podemos observar os resultados obtidos na simulação onde foram adotados os melhores valores de tamanho de buffer encontrados para cada nó da rede. Para esta simulação foram aplicados os valores de simulação apresentados na tabela 5.21. Foi obtido como 1,59 atraso médio e 1,24 como média de células perdidas. Como era esperada, a média entre os valores do tamanho do buffer nos nós da rede é 10.

Tabela 5.21 - Valores de Simulação do Teste - melhor valor de Tamanho de Buffer por Nó

Tempo de Simulação	100
Tempo de Conexão (contrato)	15
Número de Conexões Geradas Aleatoriamente	130
Largura de Banda	20
Tamanho de Buffer do Nó 1	10 a 25
Tamanho de Buffer do Nó 2	10
Tamanho de Buffer do Nó 3	8
Tamanho de Buffer do Nó 4	10
Tamanho de Buffer do Nó 5	8

Tabela 5.22 - Dados obtidos na Simulação aplicando os melhores valores para o tamanho do buffer

Número da Conexão	Tempo para atendimento Conexao	Tempo Realizado	Atraso	Células Emitidas	Células Perdidas
1	16	16	0	6	1
2	20	21	1	12	2
3	24	27	3	10	1
4	34	38	4	8	1
5	38	39	1	6	1
6	40	42	2	9	1
7	50	47	0	4	1
8	55	58	3	11	2
9	60	62	2	4	1
10	72	75	3	10	1
11	74	75	1	8	1
12	78	68	0	3	1
13	89	93	4	19	1
14	90	79	0	2	1
15	97	100	3	9	2
16	106	0	0	2	2
17	107	103	0	9	1
				Total = 132	Total = 21
Atraso Médio = 1,59		Média de Células Perdidas = 1,24			

5.2. Segundo Estudo de Caso

O cenário, tratado neste estudo de caso, é composto por 7 nós e 16 transições, conforme mostrado na figura 5.14.

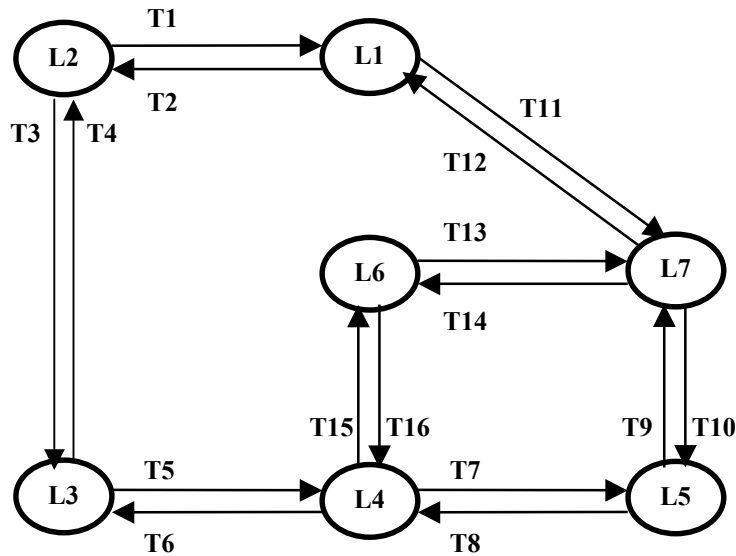


Figura 5.14 - Cenário do Segundo Estudo de Caso

As matrizes de incidência direta e reversa correspondentes ao cenário são apresentadas nas tabelas 5.23 e 5.24. Estas matrizes são inseridas através de um arquivo “.txt”, que será utilizado durante toda a simulação.

Tabela 5.23 - Matriz de Incidência Direta do Cenário

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Tabela 5.24 - Matriz de Incidência Reversa do Cenário

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Foram realizados dois testes principais. O primeiro teste deu ênfase à variação da largura de banda dos enlaces e o segundo a variação de tamanho de buffer dos nós, como no estudo de caso anterior. O objetivo dos dois testes é analisar os requisitos de QoS, atraso das conexões e perda de células, como forma de verificar o desempenho da rede e dimensionar valores para a largura de banda nos enlaces da rede e para o tamanho do buffer nos nós da rede. Outro objetivo é analisar as estatísticas geradas com relação a porcentagem de conexões aceitas e com relação as taxas dos períodos ativo (ON) e de silêncio (OFF) das três fontes aplicadas na simulação.

5.2.1. Teste 1

No primeiro teste, no qual é dado enfoque à variação de largura de banda dos enlaces, foram utilizados, durante toda a simulação, os valores apresentados na tabela 5.25.

Tabela 5.25 - Valores de Simulação do Teste 1

Tempo de Simulação (u.d.t.)	100
Tempo de Conexão (contrato – u.d.t.)	15
Número de Conexões Geradas Aleatoriamente	130
Tamanho do Buffer (células)	20

Na tabela 5.26 são apresentados os valores obtidos na simulação – Largura de Banda x Atraso. As estatísticas capturadas são: média de atraso das conexões, porcentagem de conexões aceitas e o número de conexões aceitas e recusadas.

Tabela 5.26 - Resultados da Simulação: Largura de Banda x Atraso

Largura de Banda	Atraso (média)	Porcentagem de Conexões Aceitas	Conexões Aceitas	Conexões Recusadas
5	1,41	52%	9	8
8	1,5	87%	14	2
10	1,61	94%	17	1
13	1,65	94%	16	1
15	1,88	100%	17	0
20	1,71	100%	17	0
25	1,82	100%	17	0
30	1,88	100%	17	0
35	2	100%	16	0
40	1,94	100%	16	0
45	1,94	94%	16	1
50	2,06	100%	17	0
55	2,06	100%	17	0
58	2,22	94%	17	1
60	2,4	93%	15	1

O gráfico correspondente às estatísticas obtidas é apresentado na figura 5.15.

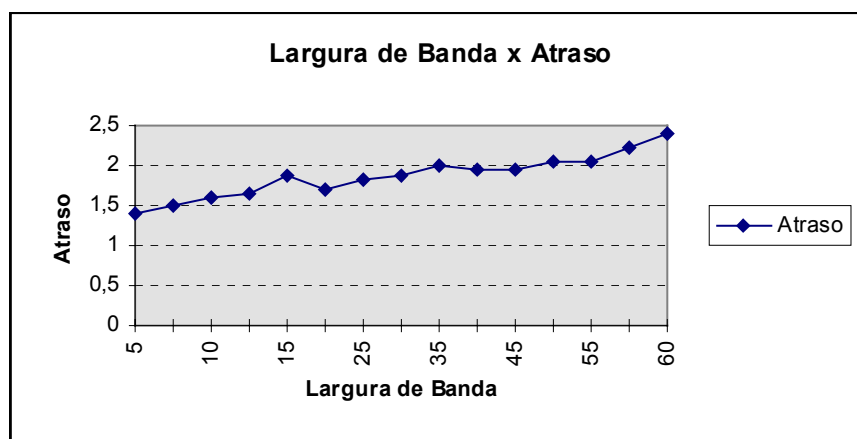


Figura 5.15 - Gráfico "Largura de Banda x Atraso"

Na tabela 5.27 são apresentados os valores obtidos na simulação: Largura de Banda x Perda de Células. As estatísticas capturadas são: média de células perdidas, porcentagem de conexões aceitas e o número de conexões aceitas e recusadas.

Tabela 5.27 - Resultados da Simulação: Largura de Banda x Células Perdidas

Largura de Banda	Células Perdidas (média)	Porcentagem de Conexões Aceitas	Conexões Aceitas	Conexões Recusadas
5	5,59	52%	9	8
8	2,44	87%	14	2
10	1,61	94%	17	1
13	1,59	94%	16	1
15	1,29	100%	17	0
20	1,53	100%	17	0
25	1,35	100%	17	0
30	1,35	100%	17	0
35	1,44	100%	16	0
40	1,38	100%	16	0
45	1,35	94%	16	1
50	1,29	100%	17	0
55	1,29	100%	17	0
58	1,28	94%	17	1
60	1,25	93%	15	1

O gráfico correspondente às estatísticas obtidas é apresentado na figura 5.16.

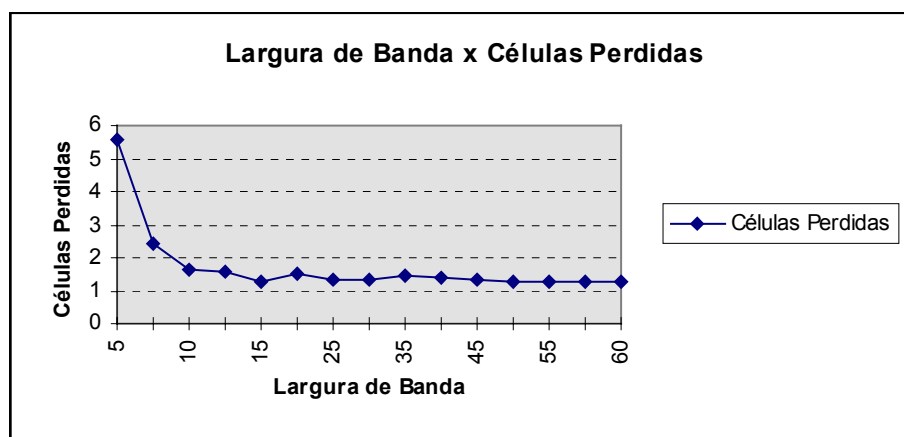


Figura 5.16 - Gráfico “Largura de Banda x Células Perdidas”

Como no estudo de caso anterior, podemos verificar que, com o aumento da largura de banda, ocorre a diminuição da perda de células e um aumento no atraso.

As taxas de surto e de silêncio das fontes 1, 2 e 3 das conexões do Teste 1 estão apresentadas na tabela 5.28.

Tabela 5.28 - Taxas de Surto e Silêncio das Fontes ON-OFF

Largura de Banda	Ton1	Toff1	Ton2	Toff2	Ton3	Toff3
5	0.833	0.167	0.510	0.490	0.674	0.326
8	0.887	0.113	0.562	0.438	0.638	0.362
10	0.845	0.155	0.689	0.311	0.708	0.292
13	0.747	0.253	0.710	0.290	0.551	0.449
15	0.827	0.173	0.735	0.265	0.600	0.400
20	0.903	0.097	0.677	0.323	0.520	0.480
25	0.856	0.144	0.568	0.432	0.724	0.276
30	0.809	0.191	0.627	0.373	0.547	0.453
35	0.827	0.173	0.793	0.207	0.609	0.391
40	0.839	0.161	0.598	0.402	0.675	0.325
45	0.847	0.153	0.624	0.376	0.543	0.457
50	0.856	0.144	0.500	0.500	0.573	0.427
55	0.839	0.161	0.684	0.316	0.647	0.353
58	0.878	0.122	0.593	0.407	0.747	0.253
60	0.844	0.156	0.604	0.396	0.506	0.494

5.2.2. Teste 2

No segundo teste foram utilizados, durante toda a simulação, os valores apresentados na tabela 5.29.

Tabela 5.29 - Valores de Simulação do Teste 2

Tempo de Simulação (u.d.t.)	100
Tempo de Conexão (contrato – u.d.t.)	15
Número de Conexões Geradas Aleatoriamente	130
Largura de Banda (células)	20

Na tabela 5.30 são apresentados os valores obtidos na simulação – Tamanho de Buffer x Atraso.

Tabela 5.30 - Resultados da Simulação: Tamanho de Buffer x Atraso

Tamanho do Buffer	Atraso	Porcentagem de Conexões Aceitas	Conexões Aceitas	Conexões Recusadas
5	1,12	100%	16	0
8	1,18	100%	17	0
10	1,65	100%	17	0
13	1,69	94%	16	1
15	1,69	100%	16	0
20	1,78	94%	17	1
25	1,88	100%	16	0
30	1,78	100%	18	0
35	1,87	100%	15	0
40	1,88	94%	16	1
45	1,88	100%	17	0
50	2,06	100%	17	0
55	2,06	94%	17	1
58	2,18	100%	17	0
60	2,41	100%	17	0

O gráfico correspondente às estatísticas obtidas é apresentado na figura 5.17.

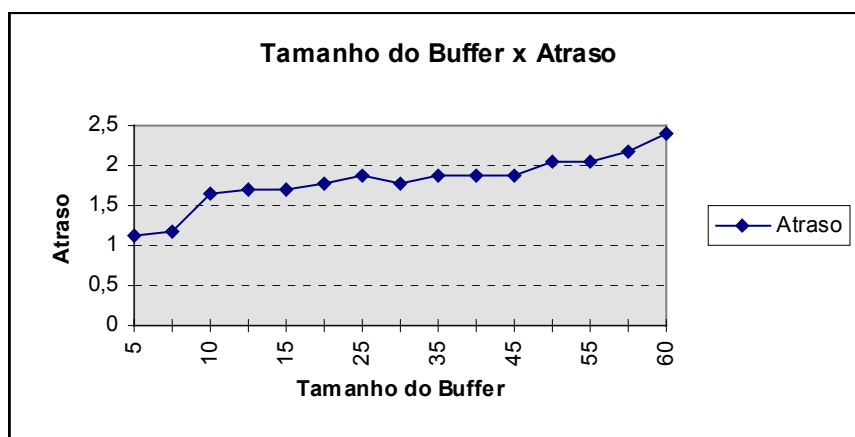


Figura 5.17 - Gráfico “Tamanho de Buffer x Atraso”

Na tabela 5.31 são apresentados os valores obtidos na simulação – Tamanho de Buffer x Perda de Células.

Tabela 5.31 - Resultados da Simulação: Tamanho de Buffer x Células Perdidas

Tamanho do Buffer	Células Perdidas	Porcentagem de Conexões Aceitas	Conexões Aceitas	Conexões Recusadas
5	1,62	100%	16	0
8	1,53	100%	17	0
10	1,47	100%	17	0
13	1,44	94%	16	1
15	1,44	100%	16	0
20	1,39	94%	17	1
25	1,38	100%	16	0
30	1,33	100%	18	0
35	1,27	100%	15	0
40	1,23	94%	16	1
45	1,23	100%	17	0
50	1,23	100%	17	0
55	1,22	94%	17	1
58	1,18	100%	17	0
60	1,12	100%	17	0

O gráfico correspondente às estatísticas obtidas é apresentado na figura 5.18.

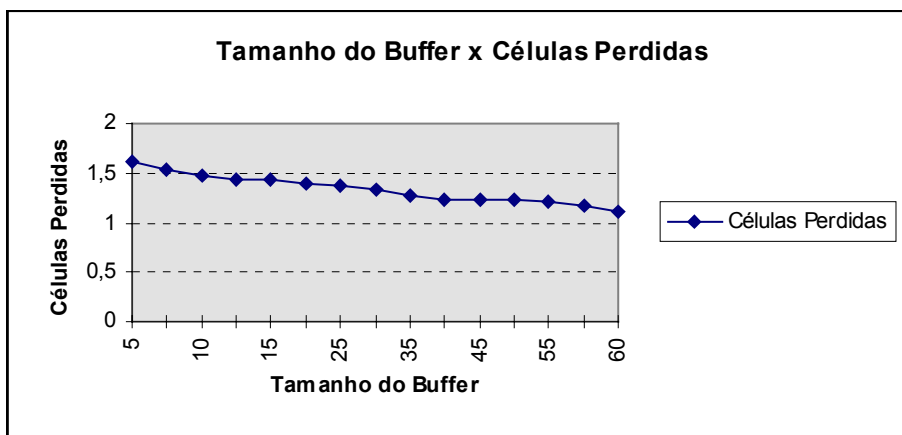


Figura 5.18 - Gráfico “Tamanho de Buffer x Células Perdidas”

Neste caso, as taxas de surto e de silêncio das fontes 1, 2 e 3 das conexões do Teste 2 estão apresentadas na tabela 5.32.

Tabela 5.32 - Taxas de Surto e Silêncio das Fontes ON-OFF

Tamanho Buffer	Ton1	Toff1	Ton2	Toff2	Ton3	Toff3
5	0.804	0.196	0.446	0.554	0.632	0.368
8	0.812	0.188	0.585	0.415	0.529	0.471
10	0.760	0.240	0.653	0.347	0.685	0.315
13	0.876	0.124	0.674	0.326	0.574	0.426
15	0.736	0.264	0.639	0.361	0.637	0.363
20	0.740	0.260	0.839	0.161	0.818	0.182
25	0.897	0.103	0.691	0.309	0.576	0.424
30	0.844	0.156	0.699	0.301	0.663	0.337
35	0.733	0.267	0.549	0.451	0.611	0.389
40	0.681	0.319	0.645	0.355	0.742	0.258
45	0.860	0.140	0.660	0.340	0.578	0.422
50	0.857	0.143	0.489	0.511	0.670	0.330
55	0.857	0.143	0.698	0.302	0.618	0.382
58	0.884	0.116	0.571	0.429	0.573	0.427
60	0.876	0.124	0.674	0.326	0.724	0.276

Nas tabelas 5.26, 5.27, 5.30 e 5.31, podemos verificar a porcentagem de conexões aceitas. Novamente podemos verificar que, com o aumento do tamanho do buffer, ocorre a diminuição da perda de células e um aumento no atraso.

5.2.3. Dimensionamento da Largura de Banda e Tamanho de Buffer

Com o intuito de verificar qual o melhor valor da largura de banda e do tamanho do buffer para ser aplicado aos enlaces e aos nós da rede, analisamos os resultados obtidos para o atraso médio e para a média de células perdidas com relação a variação do tamanho do buffer e da largura de banda, sem perder de vista a porcentagem de conexões recusadas. A tabela 5.33 apresenta os resultados do atraso e perda de células variando a largura de banda. Segundo a figura 5.19, pode-se concluir que um bom valor para a largura de banda nos enlaces da rede, seria em torno dos valores 10 e 20. Com estes valores é possível obter um baixo atraso e uma baixa perda de células no atendimento das conexões.

Tabela 5.33 - Resultados de Atraso e Células Perdidas variando a Largura de Banda

Largura de Banda	Atraso	Células Perdidas
5	1,41	5,59
8	1,5	2,44
10	1,61	1,61
13	1,65	1,59
15	1,88	1,29
20	1,71	1,53
25	1,82	1,35
30	1,88	1,35
35	2	1,44
40	1,94	1,38
45	1,94	1,35
50	2,06	1,29
55	2,06	1,29
58	2,22	1,28
60	2,4	1,25

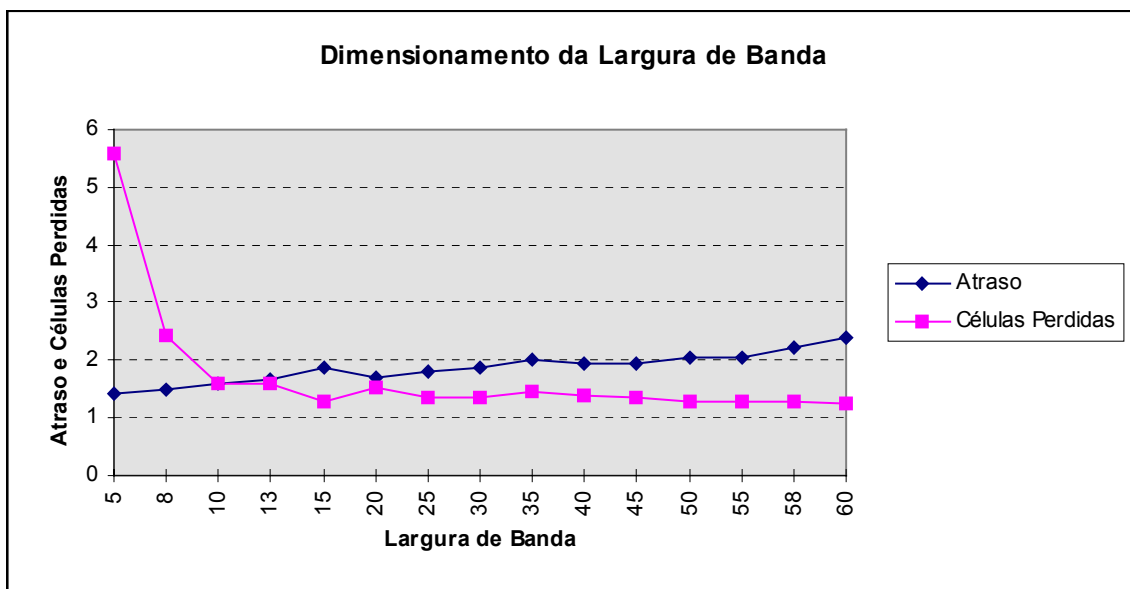


Figura 5.19 - Dimensionamento da Largura de Banda

A tabela 5.34 apresenta os resultados do atraso e perda de células variando o tamanho do buffer. A figura 5.20 sugere que um bom valor para o tamanho do buffer seria em torno de 10. Com este valor é possível obter um atraso e uma perda de células dentro do contrato.

Tabela 5.34 - Resultados de Atraso e Células Perdidas variando o Tamanho do Buffer

Tamanho do Buffer	Atraso	Células Perdidas
5	1,12	1,62
8	1,18	1,53
10	1,65	1,47
13	1,69	1,44
15	1,69	1,44
20	1,78	1,39
25	1,88	1,38
30	1,78	1,33
35	1,87	1,27
40	1,88	1,23
45	1,88	1,23
50	2,06	1,23
55	2,06	1,22
58	2,18	1,18
60	2,41	1,12

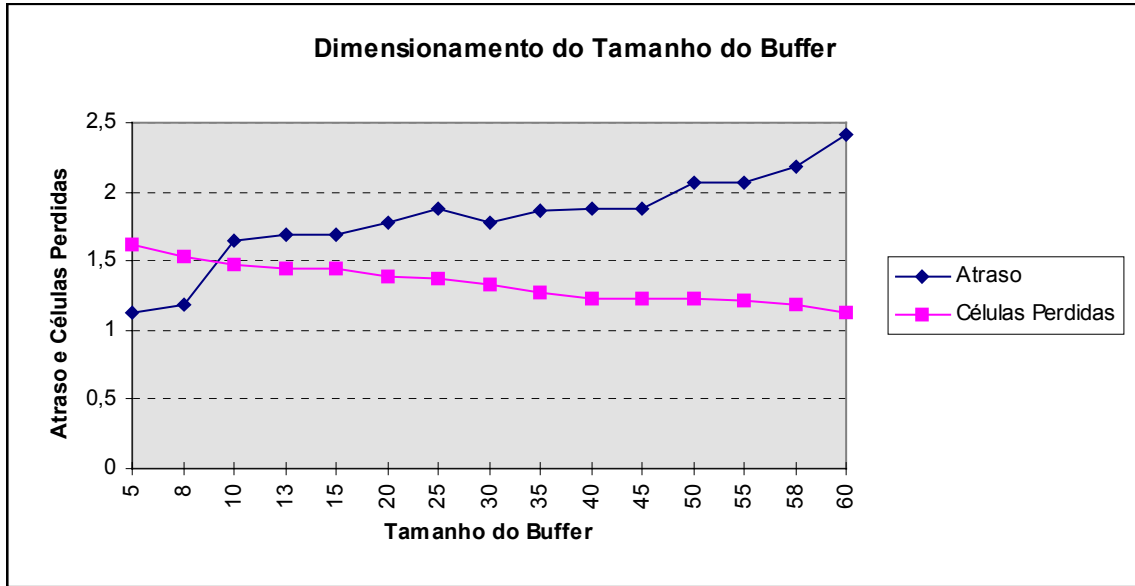


Figura 5.20 - Dimensionamento do Tamanho do Buffer

Na tabela 5.35 podemos observar os resultados obtidos na simulação, considerando como valores de largura de banda igual a 13 e de tamanho do buffer igual a 10. Nesta simulação foi obtido como atraso médio 1,33 e como média de células perdidas 1,44.

Tabela 5.35 - Dados obtidos na simulação para “largura de banda = 13” e “tamanho de buffer = 10”

Número da Conexão	Tempo para atendimento Conexão	Tempo Realizado	Atraso	Células Emitidas	Células Perdidas
1	17	20	3	13	2
2	19	20	1	7	2
3	21	22	1	6	2
4	36	38	2	13	1
5	38	33	0	7	1
6	46	51	5	7	2
7	55	57	2	5	1
8	57	60	3	14	2
9	62	61	0	6	1
10	74	77	3	11	1
11	77	77	0	4	1
12	79	81	2	8	2
13	90	92	2	9	1
14	94	83	0	2	1
15	96	90	0	8	2
16	106	98	0	5	2
17	113	102	0	2	1
18	114	0	0	1	1
				Total = 128	Total = 26
Atraso Médio = 1,33			Média de Células Perdidas = 1,44		

5.3. Conclusão

O objetivo deste capítulo foi o de apresentar dois estudos de caso, com a finalidade de validar e analisar as potencialidades do simulador implementado.

Para cada estudo de caso, representado por um cenário específico, foram aplicados dois testes. No primeiro teste foi dada ênfase na variação da largura de banda nos enlaces da rede e no segundo teste foi dada ênfase na variação do tamanho do buffer nos nós da rede. Para cada teste foram analisados os resultados obtidos com relação ao atraso médio, a média de células perdidas, porcentagem de conexões aceitas e taxas do período ativo e de silêncio das fontes geradoras de tráfego. Com estes resultados foi possível dimensionar os valores adequados de tamanho do buffer e da largura de banda.

Para o primeiro estudo de caso foi realizado um teste no qual variou-se o tamanho do buffer, de forma independente, para cada nó da rede. O intuito deste teste foi dimensionar o melhor valor a ser adotado para o tamanho do buffer para cada nó.

6. Conclusões Finais

A utilização de Redes de Petri tem-se expandido nas diversas áreas e é uma ferramenta de grande importância para a representação e análise de sistemas, principalmente de sistemas concorrentes e assíncronos. Neste trabalho, seus conceitos foram amplamente aplicados para a representação, modelagem e implementação do funcionamento interno da rede simulada, incluindo funções de decisão de melhor caminho e encaminhamento das células entre os nós origem e destino.

O desenvolvimento do simulador tem como intuito avaliar o desempenho em redes ATM e utiliza-se de uma função CAC, baseada em uma curva de rajada determinística, proposta por [CHO97], para determinar quais conexões geradas são aceitas ou recusadas. Para cada conexão aceita é realizada a manipulação da Rede de Petri, que foi inserida pelo usuário através das matrizes de incidência direta e reversa. Esta manipulação resulta na montagem da tabela de marcações e da máquina de senha. Com a montagem destas duas estruturas é possível estabelecer quais caminhos podem ser utilizados para a transmissão de células entre a origem e o destino e, com a aplicação de métricas, pode-se escolher o melhor caminho para o encaminhamento das células.

Com os testes realizados e estatísticas obtidas no simulador, demonstramos a sua capacidade de dimensionamento do tamanho do buffer nos nós da rede e da largura de banda nos enlaces da rede.

Apresentamos, com o desenvolvimento deste simulador, uma dentre várias aplicações da Rede de Petri e a sua grande contribuição para a construção desta ferramenta de gerenciamento de tráfego e análise de parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS). A utilização de Redes de Petri, no tratamento dos caminhos, requer um alto custo computacional. Deve-se ressaltar que, com a alta tecnologia dos computadores, este custo tende a reduzir.

A característica modular do simulador permite a implementação e utilização de diferentes modelos de fonte para o módulo 1 como, por exemplo, fontes MMPP, e outros tratamentos de funções CAC, para o módulo 3. Cabe ressaltar também que está pronto para aceitar a determinação de diferentes estatísticas da rede, atuando no módulo 4.

Como trabalhos futuros poderiam ser utilizadas extensões das Redes de Petri para a representação, modelagem e implementação do segundo módulo do simulador e poderia ser

aplicada como função CAC, no terceiro módulo do simulador, a Curva de Rajada Probabilística proposta em (Chong e Li, 1997). Outra proposta para trabalhos futuros seria aplicar o simulador para Redes que trabalhem com o protocolo MPLS.

Referências Bibliográficas

- [AUR97] Aura, T. & Lilius, J., “**Time Process for Time Petri Nets**”. Digital Systems Laboratory, Helsinki University of Technology, 1997.
- [BER98] Berger, A. W. & Whitt, W., “**Effective Bandwidths with Priorities**”. IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 6, no. 4, pg. 447-460, 1998.
- [BER91] Berthomieu, B. & Diaz, M., “**Modeling and Verification of Time Dependent Systems using Time Petri Nets**”. IEEE Transactions on Software Engineering, 17(3), pg. 259-273, 1991.
- [BOL97] Bolla, R. & Davoli, F. & Marchese, M., “**Bandwidth Allocation and Admission Control in ATM Networks with Service Separation**”. IEEE Comm. Magazine, pg. 130-137, 1997.
- [BRU93] Bruneell, H., “**Discrete-Time Models for Communication Systems Including ATM**”. Boston: Kluwer, 1993.
- [CHA99] Chaves, N. S. de A., “**Estudo Comparativo de Algoritmos de CAC para Redes ATM**”. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Campinas - São Paulo, Out/1999.
- [CHO97] Chong, Song & Li, San-qi, “**Probabilistic Burstiness-Curve-Based Connection Control for Real-Time Multimedia Services in ATM Networks**”. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 15, No. 6, pp. 1072-1086, August 1997.
- [DAM90] Damasceno, B. C., “**Redes de Petri**”. Apostila do Curso de Engenharia de Protocolos. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Campinas - São Paulo, 1990.

- [GIB96] Gibbens, R. J., “**Traffic Characterization and Effective Bandwidths for Broadband Network Traces**”. University of Cambridge, 1996.
- [GIB97] Gibbens, R. J. & Kelly, F. P., “**Measurement-based Connection Admission Control**”. In 15th International Teletraffic Congress Proceedings, 1997.
- [GIR99] Giroux, N. & Ganti, S., “**Quality of Service in ATM Networks**”. NJ: Prentice Hall PTR, 1999.
- [GOR95] Goralski, W. J., “**Introduction to ATM Networking**”. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [HSU96] Hsu, I. & Walrand, J., “**Dynamic Bandwidth Allocation for ATM Switches**”. J. Appl, Prob., 33, pg. 758-771, 1996.
- [KEL96] Kelly, F., “**Notes on Effective Bandwidths**”. Stochastic Networks: Theory and Applications, vol. 4, pg. 141-168, 1996.
- [KES98] Keshav, S. & Sharma, R., “**Achieving Quality of Service Through Network Performance Management**”. Cornell Network Research Group, Department of Computer Science, Cornell University, 1998.
- [KNI98] Knightly, E. W., “**Enforceable Quality of Service Guarantees for Bursty Traffic Streams**”. In Proc. of IEEE Infocom’98, 1998.
- [KNI98] Knightly, E. W. & Shroff, N. B., “**Admission Control for Statistical QoS: Theory and Practice**”. In IEEE Network, 13(2), pg. 20-29, Mar/1999.
- [LOW91] Low, S. & Varaiya, P., “**A Simple Theory of Traffic and Resource Allocation in ATM**”. In Proc. of IEEE Globecom’91, pg. 1633-1637, 1991.

- [MAC96] Maciel, Paulo R. M. & Lins, Rafael D. & Cunha, Paulo R. F., **“Introdução às Redes de Petri e Aplicações”**. 10^a Escola de Computação. Instituto de Computação. Campinas, 1996.
- [OLI98] Oliveira, Jaudelice C., **“Dimensionamento de Enlaces em Redes de Telecomunicações ATM”**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Campinas - São Paulo, Fev/1998.
- [PET81] Peterson, J. L., **“Petri Net Theory and The Modeling of Systems”**. The University of Texas at Austin. Prentice-Hall, 1981.
- [PRO97] Proth, J., **“Concepção e Gestão dos Sistemas de Produção”**. RÉS Editora, pg. 191-263, 1997.
- [PRO96] Proth, J. & Xie, X., **“Petri Nets – A Tool for Design and Management of Manufacturing Systems”**. John Wiley & Sons, 1996.
- [SAI91] Saito, H. & Shiimoto, K., **“Dynamic Call Admission Control in ATM Networks”**. IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 9, no. 7, pg. 982-989, 1991.
- [SOA95] Soares, L. F. G. & Lemos, G. & Colcher, S., **“Redes de Computadores: Das LANs, MANs e WANs às Redes ATM”**. Editora Campus, Rio de Janeiro, 1995.
- [TAN94] Tanenbaum, A. S., **“Redes de Computadores”**. Editora Campus, Rio de Janeiro, 1994.
- [TSE97] Tse, D. & Grossglauser, M., **“Measurement-based Call Admission Control: Analysis and Simulation”**. In Proc. of IEEE Infocom’97, pg. 7-11, April/1997.
- [VAL97] Valette, R. & Cardoso, J., **“Redes de Petri”**. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 1997.

[VID97] Vidal, Walderson J. R., **“Redes ATM: Uma Visão Geral”**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Campinas - São Paulo, 1997.

[XIA99] Xiao, Xipeng & Ni, Lionel M., **“Internet QoS: A Big Picture”**. IEEE Network, Vol. 13, No. 2, pp. 8-18, March 1999.

Lista de Acrônimos

ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
CAC	<i>Connection Admission Control</i>
CDV	<i>Cell Delay Variation</i>
CLP	<i>Cell Loss Priority</i>
CLR	<i>Cell Loss Ratio</i>
CTD	<i>Cell Transfer Delay</i>
DBC	<i>Deterministic Burstiness Curve</i>
FRPS	<i>Fixed Rate Process Sharing</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Standardization Sector</i>
LSP	<i>Label Switched Path</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
MBS	<i>Maximum Burst Size</i>
MCR	<i>Minimum Cell Rate</i>
MMPP	<i>Markov-Modulated Poisson Process</i>
MPLS	<i>Multiprotocol Label Switching</i>
NPC	<i>Network Parameter Control</i>
PBC	<i>Probabilistic Burstiness Curve</i>
PCR	<i>Peak Cell Rate</i>
PT	<i>Payload Type</i>
RDSI-FL	<i>Rede Digital de Serviços Integrados de Faixa Larga</i>
RPPS	<i>Rate Proportional Process Sharing</i>
SCR	<i>Sustainable Cell Rate</i>
UPC	<i>Usage Parameter Control</i>
VCI	<i>Virtual Channel Identifier</i>
VPI	<i>Virtual Path Identifier</i>