

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CLASSIFICADOR DE TRÁFEGO E SELECIONADOR DE
PARADIGMAS DE COMUTAÇÃO PARA REDES ÓPTICAS
HÍBRIDAS**

ANA CAROLINA DE OLIVEIRA DA SILVA

ORIENTADOR: WILLIAM FERREIRA GIOZZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 572/14

BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, ANA CAROLINA DE OLIVEIRA DA SILVA

CLASSIFICADOR DE TRÁFEGO E SELECIONADOR DE PARADIGMA DE COMUTAÇÃO
PARA REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS [Distrito Federal] 2014.

105p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2014)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1.Redes Ópticas Híbridas

2.Comutação Óptica por Circuitos

3.Comutação Óptica por Rajadas

4.Comutação Óptica por Pacotes

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, A. C. O. (2014). Classificador de Tráfego e Seleccionador de Paradigma de Comutação para Redes Ópticas Híbridas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-572/14, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ana Carolina de Oliveira da Silva.

TÍTULO: Classificador de Tráfego e Seleccionador de Paradigma de Comutação para Redes Ópticas Híbridas.

GRAU: Mestre

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ana Carolina de Oliveira da Silva

Quadra 103, Lote 10, Bloco B, apartamento 204, Edifício Mozart, Águas Claras.

71.909 – 000 Brasília – DF – Brasil

Ana Carolina de Oliveira da Silva

**Classificador de tráfego e selecionador de paradigma de comutação para redes
ópticas híbridas**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília.

Aprovado em: agosto de 2014.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. William Ferreira Giozza (ENE/UnB) - Presidente

Prof. Dr. André Castelo Branco Soares (DIE/UFPI) – Membro externo

Prof. Dr. Georges Daniel Anvame-Nze (ENE/UnB) – Membro interno

Prof. Dr. Ugo Silva Dias (ENE/UnB) – Suplente

Brasília

2014

DEDICATÓRIA

A Deus, por permitir mais essa vitória. Aos meu Pais e irmãos pela paciência, carinho e apoio ao longo destes anos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, aos meus pais e aos meus irmãos, pelo apoio incondicional ao longo desses anos.

Ao meu orientador, por toda a ajuda e demonstração de força de vontade, apontando os melhores caminhos, dando estímulos para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores, pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula, durante a época da graduação e agora do mestrado.

Aos meus amigos pela paciência com os meus estudos, em especial ao amigo e colega de mestrado Danilo.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário.

A UnB, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

O mistério é a coisa mais nobre de que podemos ter experiência. É a emoção que se encontra no cerne da verdadeira ciência. Aquele que não sente essa emoção e que não pode mais se maravilhar nem se espantar, é como se já estivesse morto.

Saber que aquilo que é impenetrável para nós verdadeiramente existe e se manifesta como a mais alta sabedoria e a mais radiosa beleza, que nossas formas mais primitivas, esse conhecimento, está no centro de toda verdadeira devoção.

Albert Einstein

RESUMO

Silva, Ana Carolina de Oliveira da. Classificador de tráfego e selecionador de paradigma de comutação para redes ópticas híbridas. 2014. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

Este trabalho propõe um mecanismo de classificação de tráfego e seleção de paradigma de comutação óptica para redes ópticas híbridas, isto é, redes ópticas suportando mais de um dos paradigmas de comutação dentre comutação óptica por circuitos (OCS), comutação óptica por pacotes (OPS) ou comutação óptica por rajadas (OBS). O classificador de tráfego e selecionador de paradigma de comutação óptica proposto é baseado em lógica Fuzzy (*Fuzzy logic*) e atua nos nós de entrada de uma rede óptica híbrida, verificando os parâmetros estatísticos do tráfego de entrada e selecionando o paradigma de comutação óptica mais adequado para cada tráfego. O trabalho inclui uma modelagem de diferentes tipos de tráfego, a concepção e implementação do classificador/selecionador baseado em lógica Fuzzy e estudos para fins de prova de conceito, baseados em simulações com tráfegos conhecidos na literatura. Inclui também um estudo onde o classificador de tráfego e selecionador de paradigmas de comutação óptica proposto, agregado a uma ferramenta de simulação, permitindo avaliar o desempenho de redes ópticas híbridas em termos de economia de recursos. Os resultados deste trabalho mostram que, observando-se as características estatísticas do tráfego de entrada é possível selecionar o melhor paradigma de comutação óptica para cada tipo de tráfego. Permitem também verificar que uma rede óptica híbrida, quando submetida a um tráfego não uniforme usa os recursos da rede de forma mais eficiente quando comparada a redes baseadas em um único paradigma de comutação óptica.

Palavras-chave: Redes Ópticas Híbridas; Comutação Óptica por Circuitos; Comutação Óptica por Rajadas; Comutação Óptica por Pacotes; Lógica Fuzzy.

ABSTRACT

This paper proposes a mechanism for traffic classification and selection of optical switching paradigm for hybrid optical networks, i.e., optical networks supporting more than one of the paradigms of switching among optical circuit switching (OCS), optical packet switching (OPS) or optical burst switching (OBS). The classifier and traffic selector of optical switching paradigm is proposed based on fuzzy logic and works on the input nodes of a hybrid optical network, verifying the statistical parameters of the incoming traffic and selecting the paradigm most suitable for optical switching for the incoming traffic. The work includes modeling of different types of traffic, the design and implementation of the classifier/selector based on fuzzy logic and studies for the purpose of proof of concept, based on simulations with traffic known in the literature. Also includes a study where the classifier and traffic selector of optical switching paradigms is added to a simulation tool, allows evaluating the performance of hybrid optical networks in terms of resource savings. The results of this study show that, by observing the statistical characteristics of incoming traffic is possible to select the best paradigm for optical switching for each type of traffic. They also check that a hybrid optical network when subjected to non-uniform traffic uses resources more efficiently when compared to network based on a single paradigm switching optical networks selector.

Keywords: Hybrid Optical Switching; Optical Circuit Switching; Optical Bursts Switching; Optical Packet Switching; Fuzzy Logic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de caminhos (“circuitos”) ópticos compartilhando enlaces em diferentes comprimentos de onda.	7
Figura 2 – Evolução das tecnologias de transporte (transmissão e comutação) óptico (adaptada de [20]).	8
Figura 3 – Estrutura de nós OPS [2].	10
Figura 4 – Rede OBS (adaptado de [20]).	12
Figura 5 – Montagem de rajadas em uma rede OBS.	13
Figura 6 – Funcionamento do protocolo JET (S - <i>Source node</i> , D – <i>Destination node</i>) (adaptada de [20]).	15
Figura 7 – Rede Óptica Híbrida Cliente-Servidor.	16
Figura 8 – Rede Óptica Híbrida Paralela.	17
Figura 9 – Comparação entre tráfego Poisson sintetizado (esquerda) e tráfego Internet real (direita) – escala de 0,1 segundos [41].	22
Figura 10 – Comparação entre tráfego Poisson sintetizado (esquerda) e tráfego Internet real (direita) – escala de 100 segundos [43].	22
Figura 11 – Conjunto de Mandelbrot (a) e um subconjunto de Mandelbrot (b) [44].	23
Figura 12 – Processo estocástico autossimilar e seu comportamento multiescalar [30].	24
Figura 13 – Prova visual da autossimilaridade: Tráfego Ethernet (pacotes por unidade de tempo) e um tráfego sintético poissoniano em 5 escalas temporais [10].	26
Figura 14 – Estimativa do parâmetro de Hurst e Intervalo de confiança para a contagem de pacotes e bytes por dia da semana [11].	28
Figura 15 – Estimativa do parâmetro de Hurst e Intervalo de confiança para a contagem de pacotes pela utilização do link. [11].	29
Figura 16 – Tráfego real e seu expoente de Hölder [28].	32
Figura 17 – Espectro de Legendre [28].	32
Figura 18 – a) Tráfego real b) Tráfego multifractal sintético c) Tráfego autossimilar sintético [58].	34
Figura 19 – Classificador de tráfego.	36
Figura 20 – Sistema especialista.	38

Figura 21 – Sistema Fuzzy.....	38
Figura 22 – Exemplo de função de pertinência.	40
Figura 23 – Inferência Fuzzy [59].	40
Figura 24 – Defuzzyficação [57].	41
Figura 25 – Classificador/selecionador baseado em lógica Fuzzy – Modelo 1.	43
Figura 26 – Classificador/Selecionador – Entrada λ (tela extraída do MATLAB).	44
Figura 27 – Classificador/Selecionador – Entrada Δt (tela extraída do MATLAB).....	44
Figura 28 – Classificador/Selecionador baseado em lógica Fuzzy – Entrada H, Modelo 1 (extraída do MATLAB).	45
Figura 29 – Classificador/Selecionador baseado em lógica Fuzzy – Entrada H, Modelo 2 (tela extraída do MATLAB).	45
Figura 30 – Classificador/Selecionador baseado em lógica Fuzzy – Saída, Modelo 1 (tela extraída do MATLAB).	46
Figura 31 – Classificador/Selecionador baseado em lógica Fuzzy – Saída, Modelo 2 (tela extraída do MATLAB).	46
Figura 32 – Superfícies de controle do Classificador/Selecionador. Modelo 1 à esquerda e Modelo 2 à direita (tela extraída do MATLAB).....	49
Figura 33 – Agendamento de eventos no TONetS [64].	52
Figura 34 – Reserva e liberação dos recursos no TONetS estendido.....	53
Figura 35 – Funcionamento do TONetS com o Classificador de tráfego.	54
Figura 36 – Série temporal do tráfego Ethernet (pacotes por unidade de tempo) em 5 escalas temporais. Diferentes tons de cinza são utilizados para identificar o mesmo segmento do tráfego em escalas temporais distintas [10].	56
Figura 37 – Estimativa do parâmetro de Hurst em 2002 e 2003 [11].	61
Figura 38 – Estimativa do parâmetro de Hurst em 2002 e 2003 [11].	62
Figura 39 – Série temporal representando os intervalos entre pacotes RTP [63].	66
Figura 40 – Resultado do processo de inferência e <i>defuzzificação</i> no Classificador/Selecionador sob tráfego VoIP.	68
Figura 41 – Topologia simples analisada.	70
Figura 42 – Utilização da rede OCS sob carga inicial de 10 Erlangs.	70
Figura 43 – Utilização da rede por Comprimento de Onda da rede OCS sob carga inicial de 10 Erlangs.	71
Figura 44 – Utilização da Geral da Rede OCS sob carga inicial de 140 Erlangs.	72

Figura 45 – Utilização da rede por Comprimento de Onda da rede OCS sob carga inicial de 140 Erlangs.	72
Figura 46 – Utilização Geral da Rede OBS sob carga inicial de 140 Erlangs.	73
Figura 47 – Utilização por Comprimento de Onda OBS sob carga inicial de 140 Erlangs.	73
Figura 48 – Utilização Geral com Comutação Híbrida OCS/OBS sob carga inicial de 140 Erlangs.	75
Figura 49 – Utilização por Comprimento de Onda com Comutação Híbrida OCS/OBS sob carga inicial de 140 Erlangs.....	75
Figura 50 – Probabilidade de Bloqueio com Comutação Híbrida OCS/OBS sob carga inicial de 140 Erlangs.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as tecnologias de comutação óptica [2].	15
Tabela 2 – Matriz de regras do Classificador/Selecionador.	47
Tabela 3 – Características do tráfego Ethernet utilizado para validação do Classificador/Selecionador [10].	58
Tabela 4 – Características do tráfego Internet (ano de 2002) utilizado para validação do Classificador/Selecionador [11].	63
Tabela 5 – Características do tráfego Internet (ano de 2003) utilizado para validação do Classificador/Selecionador [11].	64
Tabela 6 – Características estatísticas do tráfego VoIP utilizado para validação do Classificador/Selecionador [63].	66
Tabela 7 – Economia Relativa de Recursos.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
JET	<i>Just Enough Time</i>
JIT	<i>Just In Time</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LRD	<i>Long Range Dependence</i>
OBS	<i>Optical Burst Switching</i>
OCS	<i>Optical Circuit Switching</i>
OPS	<i>Optical Packet Switching</i>
PDF	Probability Distribution Function
PMF	Probability Mass Function
QoS	Qualidade de Serviço/ <i>Quality of Service</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RTP	<i>Real Time Protocol</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>
Tbps	<i>Terabits por segundo</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TL	<i>Time Label</i>

TONetS	<i>Transparent Optical Network Simulator</i>
VBR	<i>Variable Bit Rate</i>
VoIP	<i>Voz sobre IP/ Voice over Internet Protocol</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WWW	<i>World Wide Web</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μs	Microsegundos
λ	Taxa de chegada de pacotes
H	Parâmetro de Hurst
Δt	Tempo de interchegadas
σ	Intensidade de tráfego
E	Erlangs
$1/\mu$	Tempo de interchegadas
s	Segundos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização e motivação	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS	6
2.1 Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda (RWA)	6
2.2 Paradigmas de Redes Ópticas Híbridas	8
2.2.1 Comutação por Circuitos Ópticos (<i>Optical Circuit Switching - OCS</i>)	9
2.2.2 Comutação por Pacotes Ópticos (<i>Optical Packet Switchin - OPS</i>)	9
2.2.3 Comutação por Rajadas (<i>Optical Burst Switching - OBS</i>)	11
2.2.3.1 Montagem das rajadas	12
2.2.3.2 Protocolos de sinalização para redes OBS	14
2.3 Classificação das Redes Ópticas Híbridas	15
2.3.1 Rede Óptica Híbrida Cliente-Servidor	16
2.3.2 Rede Óptica Híbrida Paralela	17
2.3.3 Rede Óptica Híbrida Integrada	17
3 MODELAGEM DE TRÁFEGO	19
3.1 Modelo de Tráfego Poisson	19
3.2 Modelo de Tráfego Autossimilar	23
3.2.1 Modelagem Fractal e a Autossimilaridade	23
3.2.2 A identificação de autossimilaridade no tráfego	25
3.2.3 Razões para a autossimilaridade do tráfego	29
3.3 Modelo de Tráfego Multifractal	30
3.3.1 Regularidade Local de um processo e a Multifractalidade	30
3.3.2 Multifractalidade do tráfego	32
4 CLASSIFICADOR DE TRÁFEGO E SELECIONADOR DE PARADIGMA DE COMUTAÇÃO ÓPTICA	35
4.1 Lógica Fuzzy	37
4.1.1 Fuzzificação	39
4.1.2 Inferência	40

4.1.3 Defuzzyficação	40
4.2 Classificador de Tráfego e Seleccionador de Paradigma de Comutação	
Óptica.....	42
4.2.1 Classificador/seleccionador - Fuzzificação.....	43
4.2.2 Classificador/Seleccionador - Inferência	47
4.2.3 Classificador/Seleccionador - Defuzzificação.....	48
4.3 Considerações sobre a modelagem do Classificador/Seleccionador	49
5 AVALIAÇÃO DO CLASSIFICADOR/SELECCIONADOR DE PARADIGMAS	51
5.1 Ferramenta de simulação TONetS (<i>Transparent Optical Network Simulator</i>)	51
5.1.1 Funcionamento do TONetS.....	51
5.1.2 Integração do Classificador/Seleccionador ao TONetS	52
5.2 Verificação do funcionamento do Classificador/Seleccionador.	54
5.2.1 Experimento 1 (Tráfego Ethernet)	54
5.2.2 Experimento 2 (Tráfego Internet)	61
5.2.3 Experimento 3 (Tráfego VoIP).....	65
5.3 Avaliação de desempenho de rede óptica híbrida OCS/OBS	69
5.3.1 Cenário com carga inicial de 10 Erlangs	70
5.3.2 Cenário com carga inicial de 140 Erlangs	71
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e motivação

O avanço tecnológico e o constante crescimento da Internet nos últimos anos implicou em um aumento de demanda por altas taxas de transmissão e tecnologias com elevada velocidade de comutação [1]. Esse cenário torna necessário o desenvolvimento de redes que, além de alta capacidade, apresentem flexibilidade para tratar os diferentes tipos de serviços de comunicação (voz, dados, vídeo, etc.).

Nos anos 90, acompanhando o *boom* da Internet, o desenvolvimento de redes ópticas foi orientado para aproveitar todo o potencial de transmissão da fibra óptica. Foi nesse contexto que surgiu a tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), onde uma única fibra, compartilhada por vários canais ópticos (comprimentos de onda), permite ampliar significativamente a largura de banda dos enlaces ópticos e prover capacidades de transmissão da ordem de *Terabits* por segundo (Tbps) [2].

As redes ópticas podem ser classificadas em opacas, transparentes ou translúcidas [3]. Redes ópticas opacas são caracterizadas pela necessidade de conversão optoeletrônica do sinal óptico recebido em cada nó da rede. No caso das redes opacas, o sinal óptico recebido por um nó da rede é convertido para o domínio eletrônico, processado internamente e, eventualmente, reconvertido para o domínio óptico para ser retransmitido para o nó seguinte ao longo da rota estabelecida para a comunicação fim-a-fim. As redes ópticas transparentes por sua vez transportam (i.e., transmitem e comutam) o sinal óptico inteiramente no domínio óptico, sem necessidade de conversões optoeletrônicas intermediárias. Essa característica das redes ópticas transparentes tem a vantagem de eliminar os custos e atrasos introduzidos pelos conversores opto-eletrônicos. As redes ópticas translúcidas caracterizam-se por terem nós opacos e nós transparentes. Neste caso, o uso de nós opacos em localizações estratégicas permite regenerar sinais ópticos que tenham sido degradados em rotas transparentes mais longas.

As redes ópticas transparentes podem operar segundo diferentes paradigmas de comutação: a Comutação Óptica por Circuitos (*Optical Circuit Switching - OCS*), a Comutação Óptica por Pacotes (*Optical Packet Switching - OPS*) e a Comutação por Óptica por Rajadas (*Optical Burst Switching - OBS*) [2]. A fim de adaptar melhor as

características desses diferentes tipos de comutação à diversidade do tráfego transportado pelas grandes infraestruturas de telecomunicações (redes de núcleo ou *backbones*), surgiu o conceito de rede óptica híbrida, caracterizada por implementar em uma mesma rede mais de um dos paradigmas de comutação óptica. Por exemplo, pode-se conceber uma rede óptica híbrida do tipo OCS/OBS, visando aproveitar a baixa granularidade do tráfego suportado pelas redes OBS e a grande banda passante característica das redes OCS [4].

As redes ópticas híbridas têm levantado grande interesse como uma forma de integrar diferentes tipos de tráfego e serviços utilizando a mesma infraestrutura de rede [5]. O conceito de redes ópticas híbridas tem sido expandido recentemente de modo a englobar também propostas que suportam tráfego com baixíssima granularidade utilizando *broadcast* [6] ou redes que operem de forma híbrida buscando, principalmente, a economia de energia nos *backbones* [7].

Espera-se que, nos próximos anos, as redes de núcleo sejam cada vez mais flexíveis e dinâmicas de forma a suportarem uma vasta gama de aplicações heterogêneas respeitando a qualidade de serviço (QoS) exigida por cada aplicação e aproveitando ao máximo os recursos oferecidos pela rede. Nesse sentido, as redes ópticas híbridas têm ganhado a atenção da comunidade científica e da indústria [8] em função do seu potencial de otimizar o desempenho da rede como um todo, reduzir custos e melhorar a escalabilidade dos nós. Uma rede óptica híbrida permite acomodar tráfegos heterogêneos com diferentes exigências de qualidade de serviço de forma a otimizar o tráfego de aplicações e serviços avançados [7].

No atual estágio do desenvolvimento das redes ópticas, procura-se implementar soluções que atendam às especificações dos clientes e respectivas demandas por qualidade de serviço, mas também, que proporcionem menores custos, otimizando o uso da infraestrutura disponível [7, 9]. As operadoras de telecomunicações têm tido como meta a integração de diferentes serviços sobre uma única rede, capaz de prover desempenhos aceitáveis para cada tipo de serviço. As vantagens de uma rede única de serviços integrados são: redução de custos operacionais, flexibilidade para suportar os serviços existentes e futuros serviços ainda não previstos, alocação dinâmica de banda, transporte integrado de todos os tipos de informação e utilização eficiente dos recursos da rede através da multiplexação estatística. A crescente demanda por aplicações multimídia também tem sido outro fator motivador para esse tipo de implementação.

A existência de mecanismos de controle de tráfego é essencial para o bom funcionamento de redes de comunicações cujos recursos sejam compartilhados. Se não há controle do tráfego, a demanda irrestrita pelos recursos compartilhados pode degradar o desempenho da rede. O controle do tráfego é portanto necessário para proteger a qualidade de serviço (QoS) percebida pelos usuários e para assegurar a eficiente utilização dos recursos da rede [7, 9].

Medições realizadas em [10], [11], [12], [13] mostraram que o tráfego presente nas modernas redes de telecomunicações possui propriedades fractais tais como dependência de longa duração (*long-range dependence* – LRD) e autossimilaridade [14]. Observou-se ainda que as particularidades do tráfego autossimilar quando comparadas ao modelo clássico poissoniano [15] e [16] provocam um comportamento inesperado da rede. Também foram identificadas propriedades autossimilares em outros contextos como no tráfego Ethernet em redes locais (*Local Area Network* - LAN) e redes de longa distância (*Wide Area Network* - WAN), tráfego de vídeo comprimido e tráfego WWW (*World Wide Web*) [10, 11, 16 e 17]. Como a autossimilaridade do tráfego pode degradar significativamente o desempenho da rede [18 e 19] é importante adequar esse tipo de tráfego às características de seu transporte (e.g., comutação) pela rede.

Portanto, é necessário que as modernas redes de telecomunicações saibam lidar com os diferentes tipos de tráfego, identificando-os adequadamente de modo a transportá-los de maneira eficiente e otimizada. Nesse contexto, as redes ópticas híbridas, com mecanismos de classificação de tráfego adequados e implementando diferentes paradigmas de comutação, constituem-se em uma importante alternativa para o desenvolvimento dos *backbones* das modernas redes de telecomunicações. Para viabilizar o transporte do tráfego de forma eficiente, esses mecanismos de classificação de tráfego e seleção de paradigma de comutação precisam ser baseados em técnicas que tratem modelos complexos de forma simples, que sejam robustas à imprecisões dos valores de entrada e que sejam flexíveis, i.e., de fácil alteração à medida que o tráfego evolui.

A constante evolução do tráfego torna a transparência a protocolos uma característica interessante para os mecanismos de classificação/seleção, se não um pré-requisito ao seu funcionamento eficiente. A análise *on-line* de parâmetros do tráfego é um processo que traz consigo incertezas associadas à estimação dos mesmos e que, podem implicar em erros na decisão sobre o paradigma de

comutação óptica mais adequado. Dessa forma, robustez à incertezas constitui um outro pré-requisito a ser atendido por um mecanismo de seleção de paradigmas de comutação.

A dificuldade em se obter modelos matemáticos precisos para a caracterização dos diferentes tipos de tráfego, além dos requisitos já citados para a elaboração de um mecanismo de classificação de tráfego e seleção de paradigmas de comutação em redes ópticas híbridas, tornam a lógica Fuzzy uma ferramenta bastante atraente para este fim e por este motivo, será explorada neste trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor um mecanismo simples, robusto e flexível, baseado em lógica Fuzzy ou nebulosa, que permita de maneira eficiente a integração das tecnologias de comutação óptica OCS e OBS em uma única rede de transporte (transmissão e comutação) aqui tratada por Rede Óptica Híbrida OCS/OBS. Este mecanismo, localizado em cada nó de entrada da rede óptica híbrida OCS/OBS, deve ser capaz de classificar o tráfego que chega, de acordo com os seus parâmetros estatísticos em determinado *slot* de tempo e de selecionar o paradigma de comutação óptica mais adequado ao seu transporte através da rede óptica híbrida OCS/OBS.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente Capítulo apresenta a motivação para o desenvolvimento deste trabalho e uma breve introdução ao seu conteúdo.

No Capítulo 2 são apresentadas as redes ópticas híbridas com uma descrição dos paradigmas de comutação englobados por esse conceito e uma classificação dos tipos de redes ópticas híbridas.

No Capítulo 3 são apresentadas as características dos principais modelos de tráfego considerados no contexto deste trabalho sobre redes ópticas híbridas.

No Capítulo 4 são introduzidos os conceitos de lógica Fuzzy e apresentado o mecanismo de classificação de tráfego e seleção de paradigmas de comutação óptica proposto neste trabalho.

O Capítulo 5 apresenta um estudo para prova de conceito do classificador/selecionador proposto num contexto de rede óptica híbrida OCS/OBS.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do presente trabalho e algumas propostas para trabalhos futuros.

2 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS

Nas últimas décadas, o rápido crescimento da Internet e a sempre crescente demanda por informações multimídia vem testando os limites das redes de computadores e telecomunicações atuais [20], provocando uma constante necessidade de desenvolvimento de redes de alta capacidade. Dessa forma, nos últimos anos, as pesquisas em redes ópticas foram realizadas visando aproveitar todo o potencial de transmissão de dados nos meios ópticos. Nesse contexto surgiu a tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [2] que permite o aumento da largura de banda por meio do compartilhamento dos enlaces ópticos por vários canais, cada um correspondendo a um comprimento de onda. Um outro esforço de pesquisa em redes ópticas passou a focar a redução da latência e custos impostos pela conversão opto-elétrica nas redes ópticas opacas, culminando no desenvolvimento das redes ópticas transparentes. As redes ópticas transparentes caracterizam-se pelo transporte da informação inteiramente no domínio óptico e pela necessidade de selecionar rotas e comprimentos de onda adequados às conexões demandadas, problema conhecido como RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) [2]. Por outro lado, a diversidade de características do tráfego transportado pelos *backbones* das redes de telecomunicações tem estimulado o estudo de diferentes paradigmas de comutação para as redes ópticas tais como: comutação por circuitos ópticos (*Optical Circuit Switching* - OCS), comutação por pacotes ópticos (*Optical Packet Switching* - OPS) e comutação por rajadas ópticas (*Optical Burst Switching* - OBS).

2.1 Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda (RWA)

O roteamento e a alocação de comprimentos de onda (*Routing and Wavelength Assignment*), ou simplesmente RWA, consiste em estabelecer caminhos ópticos (i.e., “circuitos” ópticos) através de determinado subconjunto de nós e enlaces da rede (i.e., rota), utilizando comprimentos de onda contínuos da origem ao destino.

O problema RWA pode ser subdividido em dois subproblemas: roteamento e atribuição de comprimento de onda. O roteamento pode ser classificado de maneira

geral em dois tipos: Fixo/Estático ou Dinâmico/Adaptativo. No roteamento fixo, o caminho óptico entre um par de nós origem-destino é sempre o mesmo, pré-calculado segundo algum critério (e.g., menor caminho) e portanto conhecido antes da solicitação de conexão. No roteamento dinâmico, o caminho óptico entre um par origem-destino é escolhido de acordo com o estado atual da rede, no momento da solicitação de uma nova conexão. A Figura 1 ilustra quatro exemplos de caminhos ópticos cujas rotas foram calculadas por um algoritmo de roteamento fixo selecionando o caminho mais curto entre dois nós.

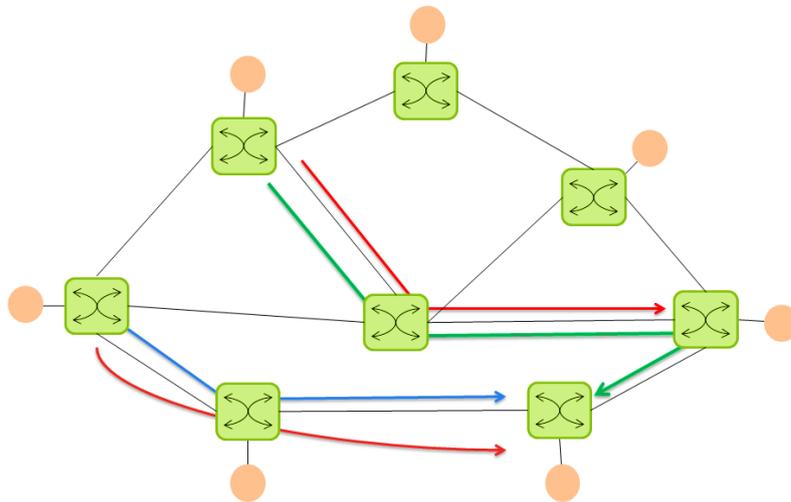


Figura 1 – Exemplos de caminhos (“circuitos”) ópticos compartilhando enlaces em diferentes comprimentos de onda.

A alocação de comprimentos de onda contínuos ao longo dos enlaces que compõem os diversos caminhos ópticos é feita de acordo com um Algoritmo de Alocação de Comprimentos de Onda. Dentre os algoritmos mais conhecidos tem-se: *Random*, *First Fit*, *Most Used*, *Least Used*, etc [21]. O algoritmo *Random* escolhe o comprimento de onda aleatoriamente, dentre os disponíveis. O *First Fit*, escolhe o primeiro comprimento de onda disponível de acordo com uma lista pré-estabelecida. *Most Used* e *Least Used* usam os comprimentos de onda mais usados e os menos usados, respectivamente.

2.2 Paradigmas de Redes Ópticas Híbridas

A fim de aproveitar ao máximo o potencial das redes ópticas transparentes, surgiram diferentes paradigmas de comutação para as redes ópticas [20]:

- Comutação por Circuitos Ópticos (*Optical Circuit Switching* - OCS);
- Comutação por Pacotes Ópticos (*Optical Packet Switching* - OPS);
- Comutação por Rajadas Ópticas (*Optical Burst Switching* - OBS).

As redes ópticas híbridas podem ser implementadas segundo dois ou mais paradigmas de comutação, de acordo com a granularidade de tráfego transmitido com maior eficiência.

A tecnologia de Rede de Comutação Óptica Híbrida ou simplesmente Rede Óptica Híbrida (*Hybrid Optical Network*), proposta inicialmente em [21], visa combinar características como o suporte a tráfego de baixa granularidade das redes OBS e a eficiência das redes OCS para transmissão de fluxos contínuos. A Figura 2 ilustra a evolução das tecnologias de transporte óptico.

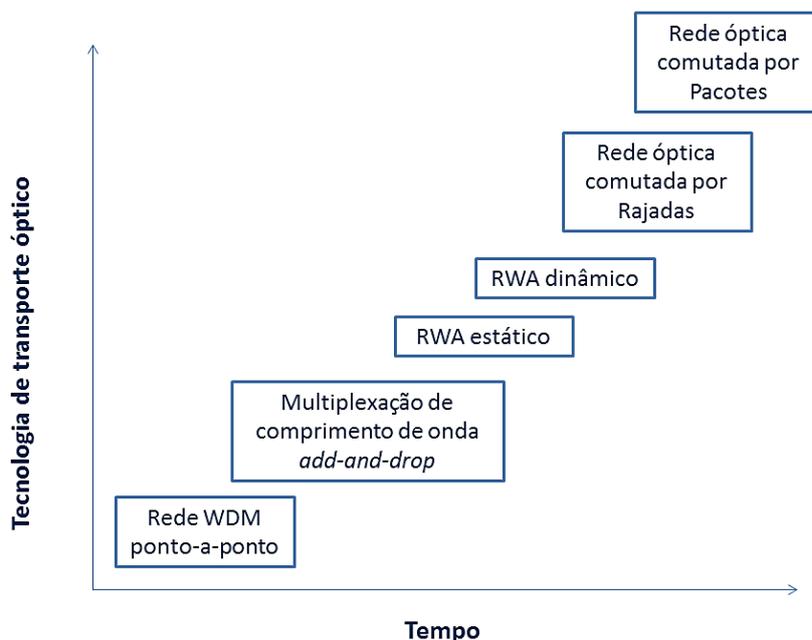


Figura 2 – Evolução das tecnologias de transporte (transmissão e comutação) óptico (adaptada de [20]).

2.2.1 Comutação por Circuitos Ópticos (*Optical Circuit Switching - OCS*)

A Comutação Óptica por Circuitos (OCS) é a tecnologia de comutação utilizada nas redes ópticas transparentes, ou seja, em que não há conversão opto-elétrica. A comunicação entre nós de origem e destino ocorre por meio do estabelecimento de um caminho óptico, ou circuito óptico, entre eles (Figura 1). Estabelecer esses caminhos ópticos envolve uma série de escolhas como topologia e determinação dos recursos, roteamento, alocação de comprimento de onda, sinalização e reserva de recursos [2].

Em particular devem ser consideradas informações como topologia física da rede e o estado dos *links* a fim de escolher qual será o recurso utilizado para uma nova conexão. Em uma rede WDM roteada por comprimento de onda, essa informação precisa incluir por exemplo a disponibilidade dos comprimentos de onda em um link [20].

Embora a comutação OCS permita aproveitar a largura de banda total oferecida pelos canais ópticos WDM nas fibras ópticas, ela se mostra ineficiente no suporte a tráfegos de menor granularidade. Quando o tráfego varia dinamicamente, transportá-lo sobre caminhos ópticos estáticos resulta em uma utilização ineficiente da largura de banda. Deste fato, surgiram esforços para buscar uma solução que evite o desperdício de recursos disponibilizados pelas redes WDM. Por outro lado, se os caminhos ópticos forem muito dinâmicos, a informação do estado da rede estará em constante mudança, dificultando a manutenção do estado atual da rede. Na comutação OCS ainda é necessário considerar que, o atraso provocado pelo estabelecimento dos caminhos ópticos pode ser relativamente grande quando comparado ao tempo de transmissão, o que dificulta o uso deste paradigma de forma mais dinâmica.

2.2.2 Comutação por Pacotes Ópticos (*Optical Packet Switchin - OPS*)

As redes de Comutação por Pacotes Ópticos (OPS) são redes equivalentes as redes de datagramas IP no domínio óptico.

A Figura 3 ilustra o funcionamento de um nó de uma Rede OPS. Após o ingresso do pacote no nó da rede, ele é armazenado temporariamente para que o plano de controle do comutador OPS extraia as informações de cabeçalho, como

endereços origem e destino e informações de controle. O armazenamento temporário, comumente chamado de *Bufferização*, pode ser obtida forçando o pacote óptico a passar por um FDL (*Fiber Delay Line*). No entanto, essa técnica pode degradar os dados, inserindo efeitos não lineares [3] e apresenta o inconveniente de processar o cabeçalho eletronicamente, provocando os atrasos típicos das redes ópticas não transparentes.

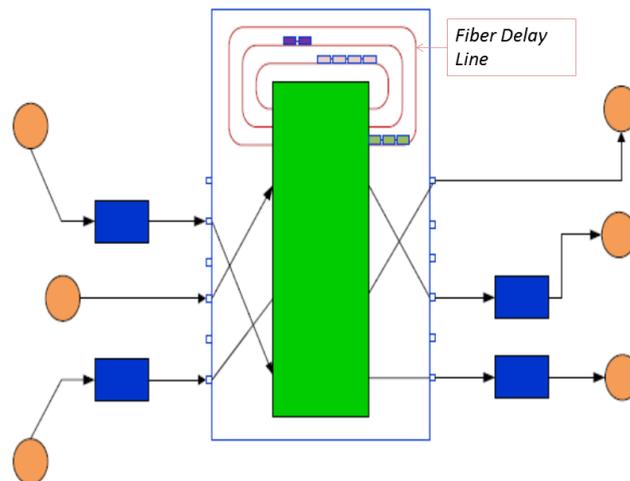


Figura 3 – Estrutura de nós OPS [2].

Outro desafio na comutação OPS é a sincronização. Se o tamanho dos pacotes for fixo, a sincronização é necessária para minimizar a contenção. Sem um equivalente óptico à memória RAM, a contenção ocorre sempre que dois pacotes precisarem chegar ao mesmo nó destino, no mesmo instante. Uma abordagem para resolver a contenção é rotear os pacotes para outro nó, que não o seu destino original, a chamada deflexão de roteamento. No entanto, essa técnica ainda precisa ser amadurecida para justificar sua implementação ou não [20].

Dessa forma, apesar de ser considerada importante para a implementação de redes totalmente ópticas, a tecnologia OPS ainda é muito imatura para que seja utilizada em curto e médio prazo em função, especialmente, da limitação tecnológica de armazenamento temporário de dados no domínio óptico [22].

Por exemplo, a utilização da OPS em determinadas aplicações como em redes *multicast* [22], apresenta restrições em função dos requisitos de transmissão rigorosos e de problemas de contenção que dificultam a garantia de latência mesmo com o tráfego leve. Por estas razões, a implementação de OPS torna-se muito complexa inibindo o seu uso [6].

2.2.3 Comutação por Rajadas (*Optical Burst Switching - OBS*)

A Comutação Óptica por Rajadas (OBS) foi proposta como uma solução de compromisso entre a comutação por circuitos e a comutação por pacotes [18]. Em uma rede OBS, múltiplos pacotes IP são agrupados em rajadas e roteados no domínio óptico (rajadas ópticas) associados a um pacote de controle. Diversas medidas de tráfego indicam que a maior parte do volume de tráfego transferido em grandes redes é formada por pacotes pequenos [23, 24, 25 e 26]. Além disso a assimetria na troca de dados torna interessante o uso de um paradigma de comutação óptica que otimize o uso da banda disponível [26]. Dessa forma, a comutação óptica por rajadas têm sido considerada uma solução promissora para redes ópticas devido à sua eficiência no uso da banda quando comparada à OCS e à facilidade de implementação quando comparada à OPS [4].

A Figura 4 ilustra as principais funções dos nós de borda e nós de núcleo em redes OBS. A montagem das rajadas ocorre na borda (nó de ingresso) da rede OBS. A transmissão de cada rajada óptica é precedida de um pacote de controle com informações sobre a rajada (*off-set* de transmissão, tamanho, etc.) para o próximo nó OBS na rota pré-estabelecida, tentando garantir a existência de recursos disponíveis no momento da passagem das rajadas, a denominada reserva de recursos. Um comprimento de onda contínuo é alocado, segundo algum algoritmo RWA, para o transporte das rajadas ópticas da origem (nó de ingresso) ao destino (nó de saída). Os nós de núcleo, sucessivamente ao longo de uma rota, ao receberem as rajadas ópticas analisam os respectivos pacotes de controle e comutam-nas para as portas de saída correspondentes à rota pré-estabelecida. No destino (nó de saída) é feita a desmontagem das rajadas e o encaminhamento dos pacotes individuais aos respectivos clientes da rede OBS.

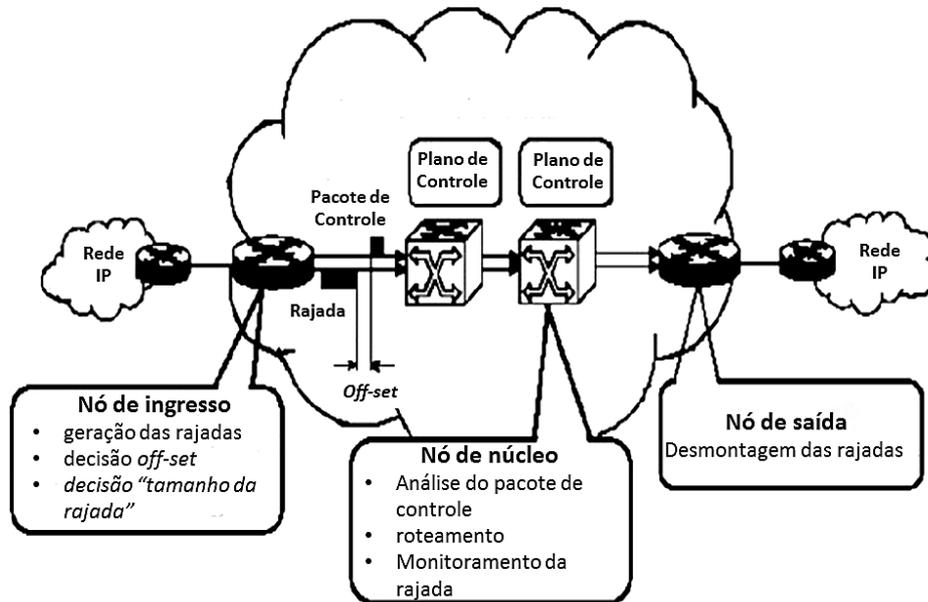


Figura 4 – Rede OBS (adaptado de [20]).

2.2.3.1 Montagem das rajadas

O montador de rajadas é a estrutura que tem como objetivo receber o fluxo de dados, provenientes das interfaces de entrada, e agrupá-los em unidades de transmissão maiores – denominados rajadas – e em seguida encaminhá-las pela rede óptica até o respectivo nó de saída. À medida em que os pacotes de dados chegam ao nó de entrada, eles são armazenados em *buffers* eletrônicos nos nós de borda da rede, de acordo com o nó destino e sua classe [4]. O mecanismo de montagem de rajadas agrupa esses pacotes de acordo com algum protocolo de montagem pré-determinado [2, 20].

O parâmetro chave da montagem de rajadas é o critério de disparo da montagem de rajadas (*trigger criteria*), ou seja, quando começar a montar uma rajada e enviá-la à rede. Esse critério é de suma importância uma vez que interfere nas características de chegada das rajadas no núcleo OBS. Há estudos que indicam que o uso de comutação por rajadas reduz a autossimilaridade da rede [27]. A Figura 5 ilustra a montagem de rajadas em uma rede OBS. Os pacotes IP são agregados em rajadas conforme um determinado critério. Cada rajada é associada a um pacote de controle que é enviado primeiramente na sub-rede de controle e, após o tempo de *offset*, a rajada é enviada na sub-rede de dados. As técnicas mais comuns de montagem de rajadas são as baseadas em limiar de tempo (*timer-based*)

e as baseadas em limiar de dados (*threshold-based*) ou, ainda, uma combinação dessas duas técnicas.

Na técnica baseada em intervalos de tempo, uma rajada é criada e enviada à rede óptica em intervalos de tempo periódicos [27]. Este tipo de técnica é utilizado para criar intervalos uniformes entre rajadas sucessivas vindas do mesmo nó de entrada ao núcleo da rede, desta forma, o tamanho das rajadas varia à medida que a carga varia [20].

Na técnica baseada no limiar de dados, é estabelecido um limite do número de pacotes contidos em cada rajada. Dessa forma, rajadas de tamanho fixo e em intervalos variados são criadas nos nós de borda [20].

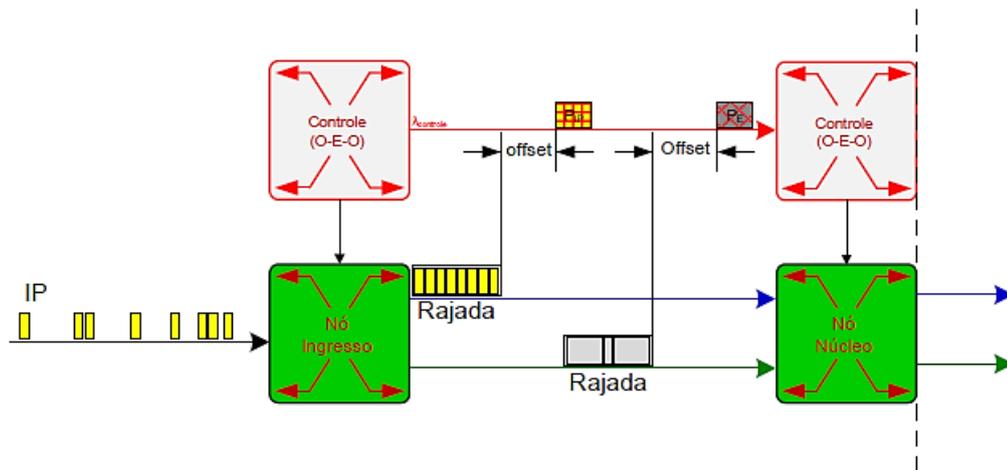


Figura 5 – Montagem de rajadas em uma rede OBS.

Ambas as técnicas são similares, uma vez que em taxa de chegada constante, um limiar pode ser escolhido em função do tempo ou do número de pacotes, resultando em uma rajada de mesmo tamanho em cada caso. Pode-se, ainda, combinar as duas técnicas de forma que o intervalo entre as rajadas e o tamanho das rajadas não apresente grande variação.

Durante a montagem de rajadas, os pacotes que chegam a cada nó são armazenados em filas de acordo com o seu destino e a sua classe. Após a montagem das rajadas, a rajada criada é enviada ao núcleo da rede. Observa-se portanto que as características das taxas de chegadas e a distribuição do tamanho dos pacotes afetam fortemente as características de chegada e a distribuição de tamanho de suas respectivas rajadas. Esse fato provocou vários debates sobre a

maneira como a montagem de rajadas afeta a distribuição do tráfego de chegada. Observou-se em particular que a montagem de rajadas reduz o grau de autossimilaridade do tráfego de pacotes de entrada (*smoothing effect*), suavizando-o [27]. Essa característica é muito interessante uma vez que é mais fácil tratar o tráfego suave (Poissoniano) do que o tráfego autossimilar [20].

2.2.3.2 Protocolos de sinalização para redes OBS

Os protocolos de sinalização das redes OBS são responsáveis pelo estabelecimento e término de um caminho óptico para a passagem das rajadas ópticas. Utilizando os protocolos de sinalização, um pacote de controle faz uma reserva prévia de recursos para cada rajada. Cada pacote de controle é associado a uma rajada e é transmitido a fim de configurar os comutadores ópticos (*optical switches*) ao longo da rota, indicando o tempo de duração da rajada e permitindo que o comutador volte a ficar disponível para outras rajadas (Fig. 5). Dessa forma, os recursos dos enlaces intermediários ficam disponíveis para novas conexões após a passagem das rajadas. Um tempo de *Off-set* permite que o pacote de controle seja processado e o comutador configurado antes que a rajada alcance os nós intermediários, evitando a necessidade de *buffers* exigida pela comutação OPS.

Existem vários protocolos de sinalização, dentre os quais destacam-se os seguintes: *Just In Time* (JIT), *Just Enough Time* (JET) e *Time Label* [20].

O protocolo de reserva de recursos JET tem por objetivo tentar garantir a disponibilidade de comprimentos de ondas livres nos comutadores ópticos da rede OBS para o trajeto da rajada óptica da rota. Um pacote de controle é enviado para todos os comutadores que pertencem a rota da rajada de dados, a partir do nó de ingresso até o nó de saída OBS. Em cada nó comutador o pacote de controle é processado, reservando o comprimento de onda para a rajada óptica que será comutada para a porta de saída e em seguida transmitida para o próximo comutador pertencente ao longo da rota pré-estabelecida. O pacote de controle é conduzido por um canal de controle exclusivo, implementado por exemplo através de um comprimento de onda de controle *Out-Of-Band* [28]. A Figura 6 ilustra o tempo de *off-set* e a reserva de recursos.

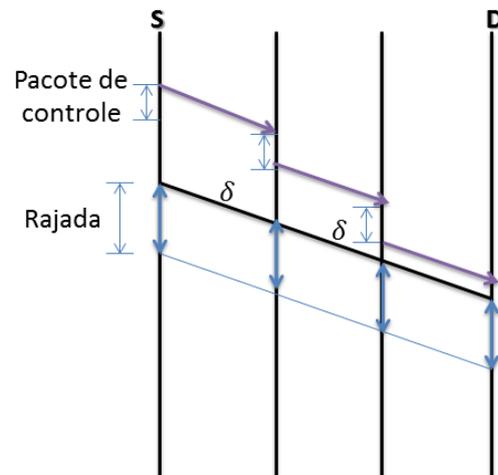


Figura 6 – Funcionamento do protocolo JET (S - *Source node*, D – *Destination node*)
(adaptada de [20]).

A Tabela 1 sintetiza as principais características das tecnologias de comutação óptica.

Tabela 1 – Comparação entre as tecnologias de comutação óptica [2].

Características	Paradigmas	OCS	OPS	OBS
Eficiência na utilização de largura de banda		Baixa	Alta	Alta
Latência de configuração		Alta	Baixa	Baixa
Velocidade de Comutação exigida		Lenta	Rápida	Média
Carga para processamento/ sincronização		Baixa	Alta	Baixa
Adaptabilidade ao tráfego		Baixa	Alta	Alta

2.3 Classificação das Redes Ópticas Híbridas

Conforme exposto anteriormente, as tecnologias de comutação OBS e OCS apresentam propriedades complementares. A tecnologia OPS apresenta a limitação tecnológica da inexistência de um equivalente à memória RAM no domínio óptico. Dessa forma, o conceito de redes ópticas híbridas proposto em [21] considera redes

que utilizam comutação OBS e OCS de maneira complementar, visando otimizar o desempenho da rede utilizando paradigmas de comutação adequados a granularidade de cada tráfego entrante.

As redes ópticas híbridas OCS/OBS podem ser classificadas, de acordo com o grau de interação e integração dos paradigmas de comutação OBS e OCS, em três arquiteturas [21]: Redes Ópticas Híbridas Cliente/Servidor, Redes Ópticas Híbridas Paralelas ou Redes Ópticas Híbridas Integradas.

2.3.1 Rede Óptica Híbrida Cliente-Servidor

Nesta arquitetura, a estrutura de comutação da rede óptica é agrupada em uma hierarquia de duas camadas, onde a camada superior é a camada cliente, representada pela tecnologia de comutação óptica OBS. Esta camada solicita um determinado serviço de transporte óptico de dados para a camada inferior, denominada de camada servidora, e que é representada pela tecnologia de comutação óptica OCS. A Figura 7 ilustra a arquitetura de rede óptica híbrida cliente/servidor.

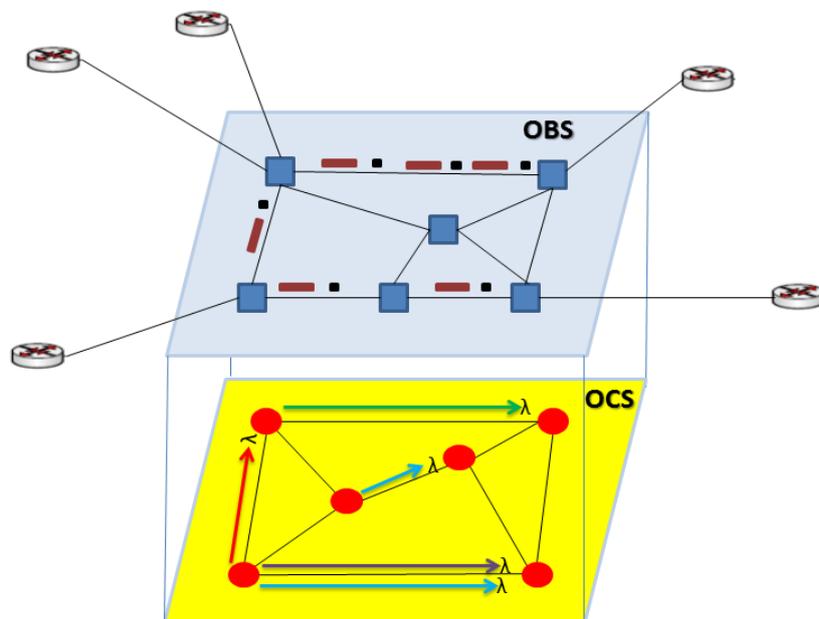


Figura 7 – Rede Óptica Híbrida Cliente-Servidor.

2.3.2 Rede Óptica Híbrida Paralela

Nesta arquitetura, a rede óptica é formada por duas camadas paralelas e independentes, cada uma utilizando uma tecnologia de comutação OBS ou OCS (Fig. 8). Assim, os nós de borda devem possuir inteligência para, analisar o tráfego e encaminhá-lo ao nó de destino, utilizando o paradigma de comutação adequado a cada caso. A rede óptica híbrida paralela é controlada de forma mais simples do que na arquitetura cliente/servidor devido à separação dos recursos utilizados por cada paradigma. Na arquitetura cliente/servidor, como o tempo de estabelecimento de caminhos ópticos na comutação OCS pode ser relativamente grande e o dinamismo da comutação OBS provoca alterações constantes na rede, pode ocorrer o chamado bloqueio por desatualização da informação [29]. Por outro lado, a divisão de recursos proporcionada pela arquitetura paralela evita esse tipo de bloqueio. Devido a essa característica, somada à sua maior simplicidade, a arquitetura de rede óptica híbrida paralela foi a escolhida para o desenvolvimento deste trabalho.

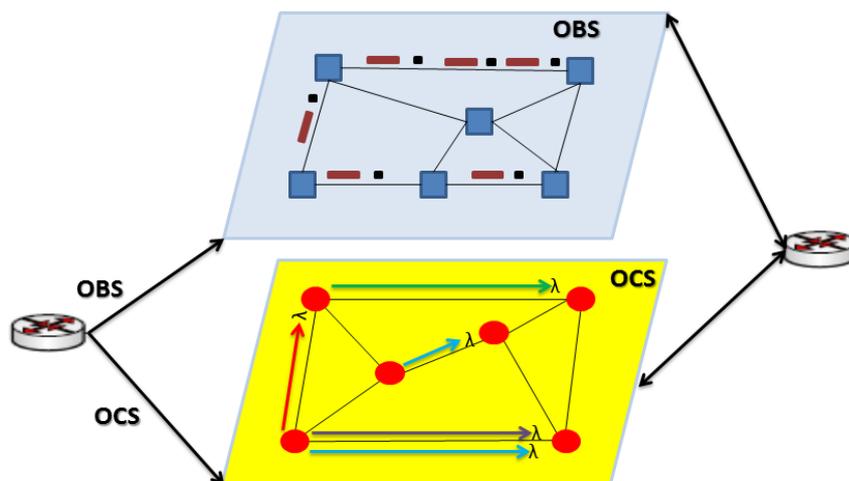


Figura 8 – Rede Óptica Híbrida Paralela.

2.3.3 Rede Óptica Híbrida Integrada

Nesta categoria de rede, duas ou mais tecnologias são integradas em uma só para oferecer o serviço de transporte de dados, o que implica que todos os nós da rede devem compartilhar os mesmos recursos como largura de banda, protocolos de sinalização, etc. Assim, os nós de borda devem classificar o tráfego como

adequado à transmissão com o paradigma OBS ou OCS e os nós intermediários fazem a comutação de acordo com o paradigma escolhido pelo nó de borda. Neste caso, dados transmitidos sob os dois paradigmas compartilham a mesma infraestrutura de fibra. Esta arquitetura é a mais difícil de implementar pois exige comutadores ópticos mais complexos [5].

3 MODELAGEM DE TRÁFEGO

As redes comutadas por circuitos pioneiras (e.g., redes de telefonia) eram eficientemente modeladas por meio dos modelos clássicos poissonianos [30]. Esses modelos clássicos, no entanto, se mostram inadequados à modelagem do tráfego das redes de dados comutadas por pacotes por não incluírem características importantes como o comportamento dos atrasos, filas e perda de pacotes [15] e [16]. Por exemplo, o tráfego típico em redes locais (*Local Area Network* – LAN) apresenta características como dependência de longa duração e autossimilaridade ou fractalidade [10]. O tráfego Internet em *backbones* apresenta comportamento, principalmente, monofractal, com flutuações descorrelacionadas [31]. Outros estudos indicam, ainda, que a natureza do tráfego Internet é multi-fractal quando analisado em pequenas escalas [14], [32], [33], [34] e [35].

A crescente diversificação e popularização do uso da Internet faz com que a busca de modelos que caracterizem melhor o seu tráfego seja constante e indispensável à engenharia de tráfego.

A ausência de um modelo único de tráfego adequado tornou necessária a análise de parâmetros estatísticos distintos para a elaboração deste trabalho. Este Capítulo introduz a noção de fractal, dependência de longa duração e autossimilaridade de segunda ordem. Também são apresentados os conceitos básicos sobre distribuições de Poisson e Exponencial, distribuição de cauda pesada e multifractalidade. Estes conceitos são necessários para permitir uma caracterização do tráfego multimídia (i.e., voz, dados e vídeo) de forma a definir o paradigma de comutação mais adequado ao tráfego em questão. Uma discussão detalhada sobre o assunto pode ser obtida em [36], [37], [38] e [39].

3.1 Modelo de Tráfego Poisson

O tráfego de voz em redes telefônicas comutadas por circuitos é modelado pelo modelo de tráfego Poisson há muito tempo [42]. O modelo poissoniano de tráfego de voz utiliza variáveis aleatórias para a chegada de chamadas segundo uma distribuição de Poisson (Eq. 2.1), e considera que as chamadas tem durações descritas por uma distribuição exponencial (Eq. 2.2).

- Poisson: $X \sim \text{Poisson}(\lambda)$ para $\lambda > 0$ é descrita pela PMF (*Probability Mass Function*):

$$p_X(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

- Exponencial: $X \sim \text{Exp}(\lambda)$ onde $\lambda > 0$ é descrita pela PDF:

$$f_X(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & \text{se } x \geq 0 \\ 0, & \text{em outro caso} \end{cases} \quad (2.2)$$

A variável aleatória de Poisson representa o número de eventos em uma unidade de tempo, por exemplo, o número de chamadas (ou de pacotes), onde λ é a taxa média de chegadas. A variável aleatória exponencial representa o tempo de interchegadas e uma fila (tempo de chegada entre duas chamadas consecutivas, por exemplo). Em geral, para qualquer variável aleatória exponencial, sempre que:

$$0 \leq x' \leq x \rightarrow P\{X > x | X > x'\} = P\{X > x - x'\} \quad (2.3)$$

Devido a essa propriedade (Eq. 2.3) [40], a variável aleatória exponencial é dita Sem Memória.

O modelo poissoniano de tráfego considera que as observações são independentes e identicamente distribuídas, ou seja, as observações em um instante de tempo qualquer não dependem de qualquer observação passada ou futura, o que estatisticamente implica em uma função de Auto-Correlação (R_x) (Eq. 2.4) nula para deslocamentos temporais diferentes de zero. A função de auto-correlação é dada por:

$$R_x(t_1, t_2) = E[\mathbf{x}_{t_1}, \mathbf{x}_{t_2}] = \iint_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 f_x(x_1, x_2; t_1, t_2) dx_1 dx_2 \quad (2.4)$$

em que $f_x(x_1, x_2; t_1, t_2)$ denota a função de densidade de probabilidade de segunda ordem de \mathbf{x}_t .

O processo de Poisson, além da ausência de memória, caracteriza-se pelo fato de que as sobreposições de processos poissonianos independentes dão origem a um processo de Poisson. Esta última propriedade é crucial para tornar o modelo de Poisson inadequado às redes atuais suportando um tráfego de pacotes de dados predominante.

As de redes telefônicas tradicionais consideravam a taxa de chegada de chamadas como poissoniana, cada uma com duração exponencial, dessa forma. A **Intensidade de Tráfego**, dada em Erlang, pode ser definida como o somatório dos tempos das chamadas telefônicas (ocupação dos canais telefônicos) em um determinado período de tempo, normalmente de uma hora. Dessa forma, em um processo poissoniano de taxa média λ e o

tempo médio de retenção dos circuitos é distribuídos exponencialmente com média $1/\mu$. A intensidade de tráfego, medida em Erlangs, é dada por $\sigma=\lambda/\mu$.

O modelo poissoniano relaciona o número de canais disponíveis por célula com o tráfego do sistema resultando na probabilidade de bloqueio (Erlang B), dada pela Eq. (2.5) ou a probabilidade de conexão com atraso (Erlang C), dada pela Eq. (2.6) [41].

$$P_{Bloqueio} = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}} \quad (2.5)$$

Onde:

$P_{Bloqueio}$ = Probabilidade de a chamada ser bloqueada e perdida;

C = número de canais;

A = tráfego oferecido em Erlangs.

$$P_{Atraso} = \frac{A^C}{A^C + C! \cdot \left(1 - \frac{A}{C}\right) \cdot \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}} \quad (2.6)$$

Onde:

P_{Atraso} = Probabilidade de todos os agentes estarem ocupados ou de o cliente ter de esperar na fila;

C = número de canais;

A = tráfego oferecido em Erlangs.

A relativa simplicidade do modelo Poisson implica na previsibilidade das taxas de crescimento, o que permitiu o planejamento e dimensionamento a longo prazo das estruturas das redes telefônicas com sucesso. Essa confiança nos modelos de redes de voz influenciou o seu uso nas redes de pacotes surgidas no século XX. No entanto, a evolução das aplicações e a conseqüente mudança na natureza do tráfego fez com que esse modelo se tornasse obsoleto. O tráfego observado nas atuais redes Internet apresenta rajadas mesmo quando se trata de tráfego agregado, taxas de chegadas correlacionadas e não acompanha uma taxa de transmissão estável, como seria pressuposto pelo modelo Poisson. Essa mudança na natureza do tráfego implicou em uma reavaliação dos métodos para dimensionamento de redes e na busca por novos modelos de caracterização do tráfego.

As Figuras 9 e 10 ilustram a diferença entre uma série de tráfego real e um tráfego sintetizado segundo o modelo Poisson com os parâmetros extraídos do tráfego real em escalas de tempo distintas [42]. Os gráficos são séries de tráfego TCP (*Transmission Control Protocol*) com duração de uma hora, coletados 1995 e disponíveis em [43].

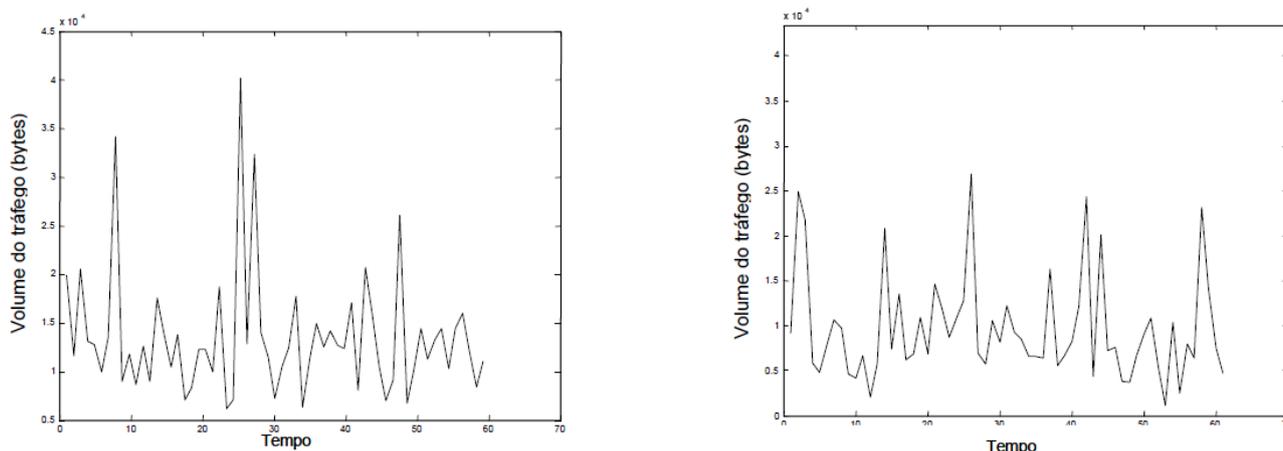


Figura 9 – Comparação entre tráfego Poisson sintetizado (esquerda) e tráfego Internet real (direita) – escala de 0,1 segundos [41].

A Figura 9 mostra um intervalo de 6 segundos em uma escala de 0,1 segundo em cada uma das séries. Nesta escala, a série de tráfego produzida pelo modelo Poisson aproxima as rajadas do tráfego real de forma satisfatória.

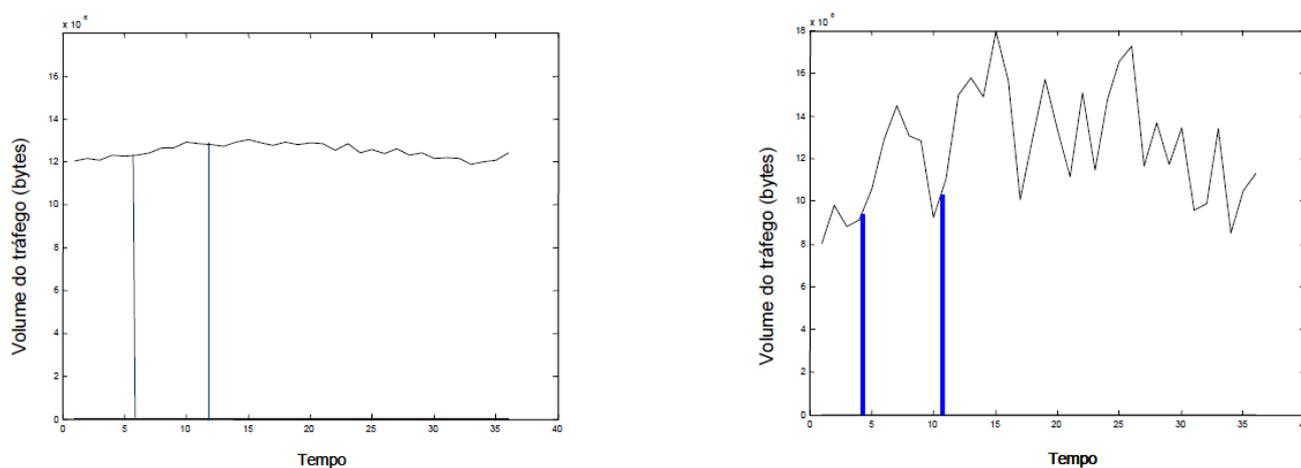


Figura 10 – Comparação entre tráfego Poisson sintetizado (esquerda) e tráfego Internet real (direita) – escala de 100 segundos [43].

A Figura 10 ilustra um intervalo de 6.000 segundos em uma escala de 100 segundos para ambas as séries de tráfego. O tráfego real mesmo agrupado, não teve as rajadas

suavizadas, característica que estatisticamente indica dependência de longa-duração. Nitidamente, o tráfego gerado com o modelo Poisson, se afasta muito do tráfego real, apresentando uma curva onde as rajadas foram suavizadas à medida em que o tráfego foi visto de forma mais agrupada, não servindo, portanto, à descrição do tráfego das redes atuais. Nesse contexto, os modelos de longa-duração ganharam um interesse crescente.

3.2 Modelo de Tráfego Autossimilar

3.2.1 Modelagem Fractal e a Autossimilaridade

A maior parte das formas encontradas na natureza perde suas estruturas quando ampliadas. Isso não ocorre com as estruturas chamadas fractais. O termo fractal foi proposto em 1975 [14] para designar objetos metálicos que possuem estrutura rica em detalhes ao longo de muitas escalas de observação. A Figura 11a ilustra um fractal matemático conhecido como Conjunto de Mandelbrot ou “Boneco de pão de mel” obtido com o código MATLAB de A. Klimke [44].

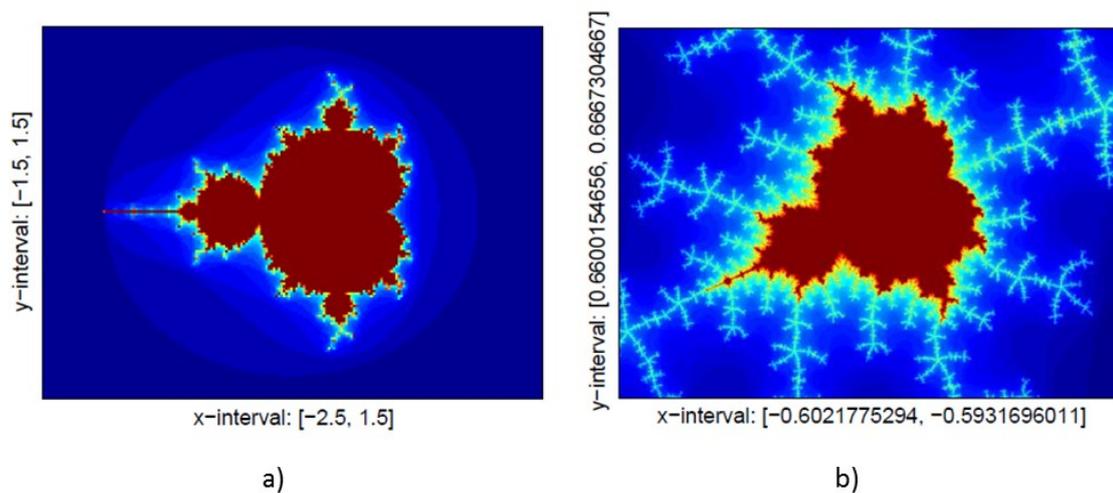


Figura 11 – Conjunto de Mandelbrot (a) e um subconjunto de Mandelbrot (b) [44].

A Figura 11b ilustra um “subconjunto” de Mandelbrot obtido por meio do zoom de uma região da figura 11a. A semelhança observada entre as duas figuras ilustra uma propriedade importante dos fractais: a **Autossimilaridade**. Um objeto autossimilar contém réplicas de si mesmo em infinitas escalas. O conjunto de Mandelbrot é um exemplo de fractal determinístico, pois é exatamente autossimilar [45]. Os fractais aleatórios são os que apresentam autossimilaridade no sentido estatístico como, por exemplo, séries temporais

de hidrologia ou séries de dados financeiros que envolvem uma extensa faixa de medição [35].

Um processo estocástico contínuo no tempo $\{X_t\}$ é fortemente autossimilar com parâmetro de Hurst, H , $0 < H < 1$, se, para qualquer fator de escala positivo, for válida a relação:

$$X(t) = a^{-H}X(at), a > 0 \quad (2.7)$$

A Equação 2.7 expressa que o processo estocástico $a^{-H}X_{at}$ apresenta uma distribuição igual à do processo X_t , ou seja, igualdade no sentido probabilístico. Visualmente, um *zoom* em um processo estocástico autossimilar resultará em uma estrutura muito semelhante ao trecho original de maior escala. A figura 12 ilustra essa característica.

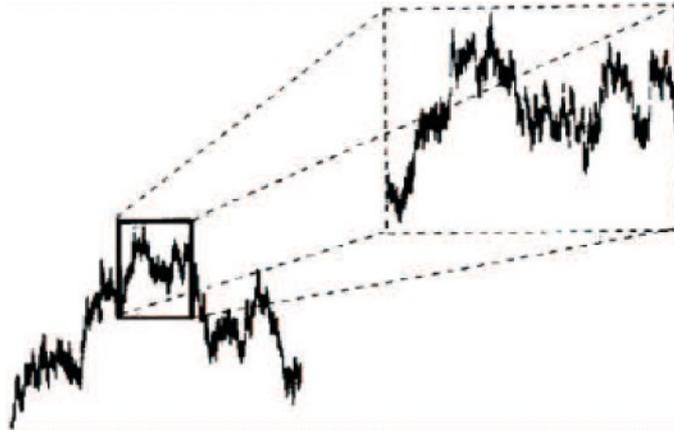


Figura 12 – Processo estocástico autossimilar e seu comportamento multiescalar [30].

Um processo estocástico pode ser também classificado como **Monofractal**, neste caso, além da autossimilaridade, o processo deve apresentar **Dependência de Longa Duração**. A dependência de Longa duração é definida em termos da função de autocorrelação do processo $R_x(\tau)$ (Eq. (2.4)). Um processo apresenta longa duração se a relação (2.8) for válida.

$$\int_A^{+\infty} R_x(\tau) d\tau = +\infty, \quad \forall A > 0 \quad (2.8)$$

A Equação (2.8) expressa que a autocorrelação $R_x(\tau)$ do processo decai tão devagar que sua soma diverge. Essa característica interfere na inferência estatística e processos com este comportamento tem a estimação de parâmetros estatísticos como média e desvio padrão dificultada. Processos autossimilares com parâmetro de Hurst entre

o intervalo $0,5 < H < 1$ apresentam dependência de longa duração [30] e, quanto mais próximo de 1 for o valor de H , mais persistente é a série ou processo.

3.2.2 A identificação de autossimilaridade no tráfego

A identificação de propriedades autossimilares no tráfego Ethernet na década de 90 [10] voltou a atenção das pesquisas à análise de diversos tipos de tráfego onde a autossimilaridade também foi identificada [15], [16], [17], [46], [11], [47] provocando uma ruptura com os antigos modelos poissonianos.

O tráfego Ethernet pode ser considerado estatisticamente autossimilar, independente da data e local da coleta dos dados, e o grau da autossimilaridade é medido pelo parâmetro de Hurst (H) [10]. Conseqüentemente, medidas comumente utilizadas para caracterizar tráfego em rajadas como índice de dispersão, taxa média de pico, coeficiente de variação no tempo de interchegadas não têm significado no tráfego autossimilar, e são substituídas pelo parâmetro H . Este tipo de tráfego, portanto não pode ser descrito pelo tradicional modelo poissoniano. A Figura 13 ilustra o tráfego Ethernet analisado neste trabalho e demonstra a autossimilaridade graficamente. Diferentes tons de cinza são utilizados para identificar o mesmo segmento do tráfego em escalas temporais distintas.

O tráfego autossimilar possui propriedades como invariância à escala e a dependência de longa duração que se chocam diretamente com as propriedades assumidas pelos modelos poissonianos de tráfego. A invariância à escala implica na equivalência estatística do processo em escalas de tempo diversas, ou seja, um aumento na escala de observação não o atenua graficamente, conforme ilustrado na Figura 13. A dependência de longa duração implica que os picos de tráfego podem durar um tempo suficientemente grande, ou seja, o tráfego autossimilar apresenta persistência temporal.

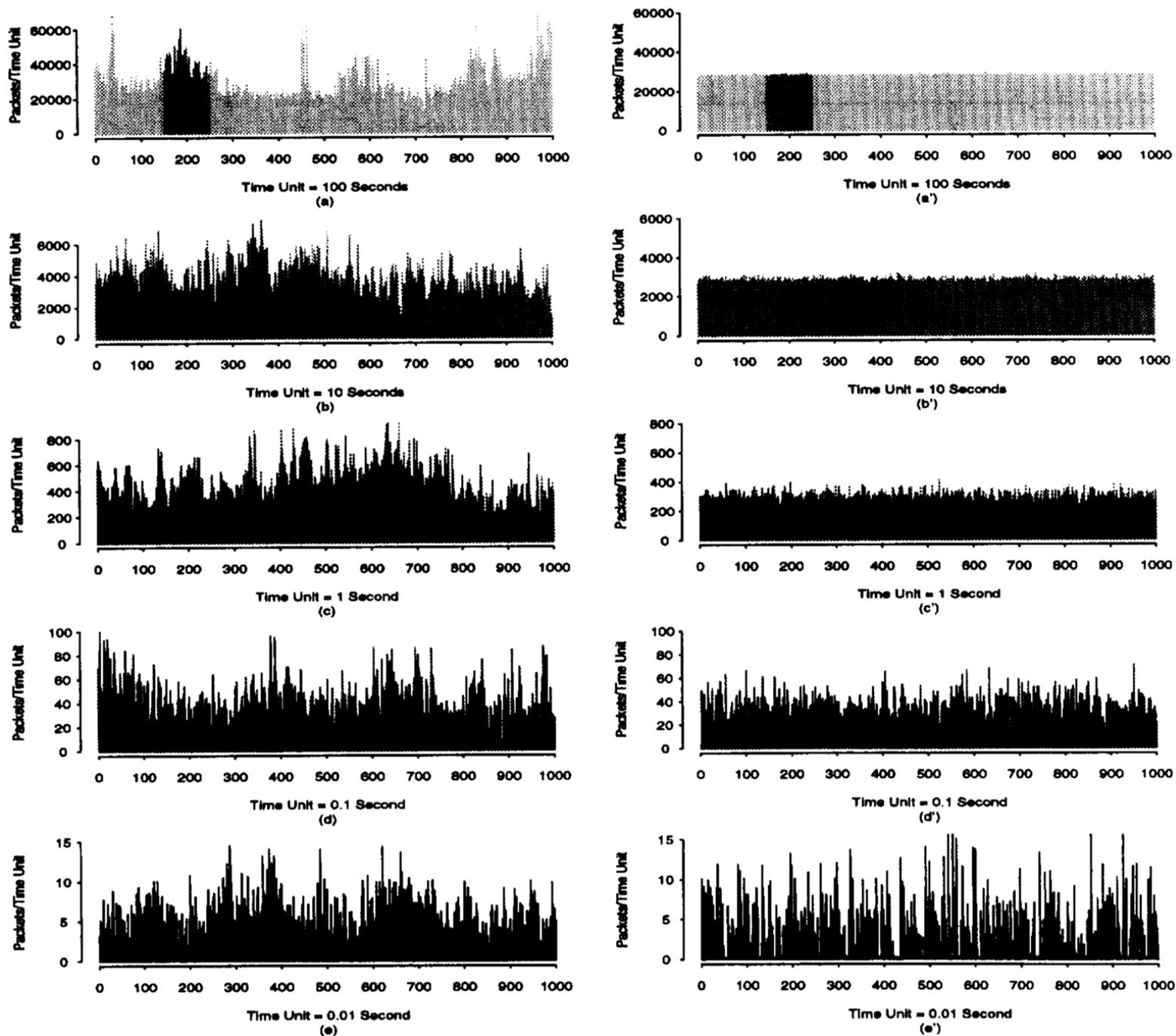


Figura 13 – Prova visual da autossimilaridade: Tráfego Ethernet (pacotes por unidade de tempo) e um tráfego sintético poissoniano em 5 escalas temporais [10].

Em 1995, Beran mostrou que o tráfego de vídeo VBR (*Variable Bit Rate*) apresentava dependência de longa duração [17]. No mesmo ano, Paxson mostrou que o tráfego Internet em WAN's (*Wide Area Network*) apresentava características autossimilares [16] e indicou que essas características tinham diversas implicações no controle de congestionamento e desempenho do tráfego. Paxson sugeriu, então, que os modelos poissonianos para tráfego

WAN fossem abandonados na maioria dos casos, exceto para a taxa de chegada de sessão dos usuários.

Em 1997, Crovella mostra que o tráfego *World Wide Web* apresenta características autossimilares e associa as distribuições das aplicações, o tamanho dos documentos, os efeitos de busca e transferência de arquivos às causas da autossimilaridade [47].

Em 1999, Sahinoglu apresenta um estudo da autossimilaridade do tráfego multimídia em redes convergentes com suas implicações no desempenho da rede, métricas e a limitação da validade dos modelos tradicionais na alocação de recursos na presença de tráfego autossimilar [46].

Em 2005, Park, mostrou que o surgimento e popularização de uma única aplicação na Internet conseguiu provocar diferenças marcantes e consistentes no tráfego observado em dois anos consecutivos (2002 e 2003) no mesmo local [11], deixando clara a necessidade da análise periódica do tráfego uma vez que a Internet está em constante crescimento e evolução de suas aplicações. A figura 14 ilustra este efeito na análise da contagem de pacotes onde, claramente, a estimativa de H para a contagem de pacotes foi significativamente menor em 2003 em relação à 2002 enquanto que a estimativa de H para a contagem de bytes apresentou pequenas diferenças entre os dois anos.

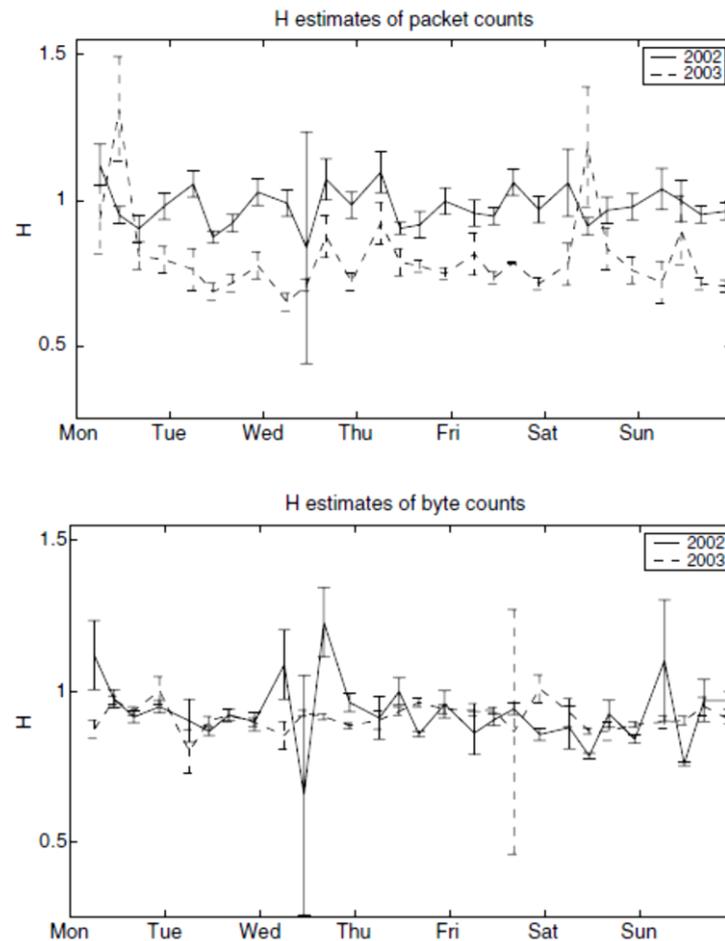


Figura 14 – Estimativa do parâmetro de Hurst e Intervalo de confiança para a contagem de pacotes e bytes por dia da semana [11].

O trabalho de Park [11] mostrou, ainda, que a dependência de longa duração independe do dia da semana, hora do dia, ou mesmo da carga (*link utilization*), não sendo possível, portanto, estabelecer uma relação entre a dependência de longa duração e o número de conexões ativas agregadas. A figura 15 ilustra essa característica uma vez que não há efeito na variação de H para diferentes cargas. Este resultado é de suma importância para a elaboração deste trabalho, uma vez que mostra que não há relação direta entre os parâmetros H e taxa de pacotes/segundo (λ).

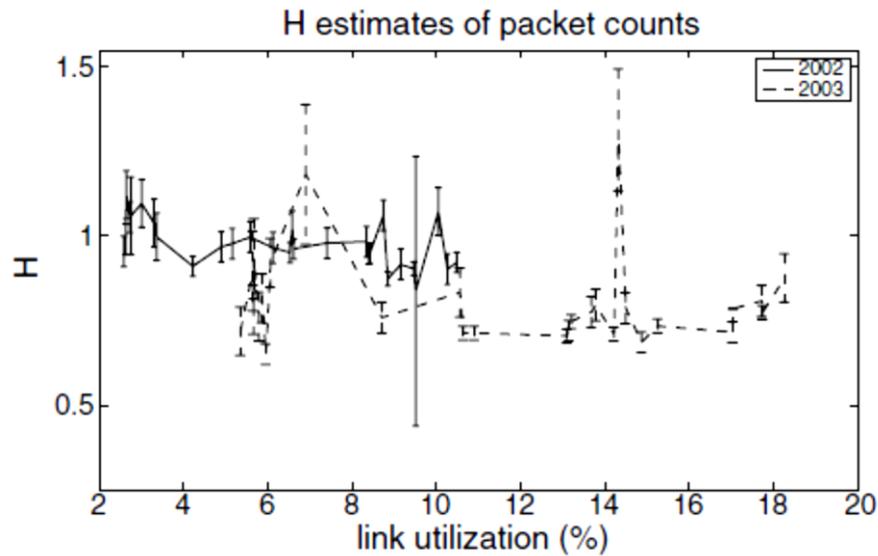


Figura 15 – Estimativa do parâmetro de Hurst e Intervalo de confiança para a contagem de pacotes pela utilização do link. [11].

Outros trabalhos demonstraram, ainda, que a natureza dos congestionamentos provocados pelo tráfego autossimilar difere drasticamente das previsões feitas pelos modelos poissonianos, o que pode provocar sérios problemas ao desempenho da rede. Segundo [18], na presença de tráfego autossimilar o aumento no tamanho dos *buffers* não resulta em grande redução na perda de pacotes e um leve aumento no número de conexões ativas pode resultar em um grande aumento da taxa de perda de pacotes, o que difere fortemente das previsões feitas pelos modelos poissonianos. Recentemente, o desempenho dos *buffers*, e o conseqüente desempenho dos roteadores, sujeitos ao tráfego autossimilar tem sido foco de grande preocupação a fim de garantir a alocação correta de recursos, especialmente nas redes de grande porte [12], [13], [42], [50].

3.2.3 Razões para a autossimilaridade do tráfego

As possíveis causas para a autossimilaridade do tráfego são investigadas desde a publicação do trabalho de Leeland [10, 15]. Alguns autores associam as propriedades autossimilares do tráfego à variabilidade do tamanho das sessões individuais que compõe o tráfego e à formação dessas sessões por uma distribuição de cauda pesada [11], [15], [16], [42], [47]. Gong reexamina a questão e, utilizando um modelo *on-off* Markoviano que explica a LRD do tráfego IP, defende que as múltiplas escalas de tempo envolvidas no mecanismo de geração do tráfego – como a diferença de duração entre os protocolos na

camada de transporte e os protocolos da camada de aplicação – fazem com que a observação da dependência de longa duração seja inevitável [49].

O presente trabalho não tem como foco discutir profundamente as causas do comportamento do tráfego, no entanto, é importante deixar claro que negligenciar a autossimilaridade pode levar à previsões otimistas e irrealistas do desempenho da rede, provocando o dimensionamento inadequado da rede e uma alocação de recursos inapropriada.

3.3 Modelo de Tráfego Multifractal

3.3.1 Regularidade Local de um processo e a Multifractalidade

O parâmetro de Hurst é uma propriedade global que quantifica com eficiência as alterações no processo com a mudança de escala. No entanto, a presença de pontos singulares em um processo estocástico pode fazer com que o parâmetro de Hurst deixe de ser uma constante e passe a ser uma função aleatória. Um ponto singular é definido como um ponto em uma equação, curva ou superfície em que esta apresenta transições ou se torne degenerada [30]. No caso de redes comutadas por pacotes, é bastante comum que os pontos singulares contêm informações importantes. Dessa forma, mensurar o grau de singularidade de um tráfego é uma tarefa importante caso haja a ocorrência de pontos singulares. O **Expoente de Hölder** (α_p) é capaz de descrever o grau de singularidade de um processo, quantificando a variação instantânea de um sinal e indicando o grau de rajadas [50].

Dada a função f com imagem e domínio reais, x_0 um número real, α um número real estritamente positivo, pode-se dizer que $f \in C^\alpha(x_0)$ se existir um polinômio P_m com grau $n < \alpha$ tal que:

$$|f(x) - P_m(x - x_0)| \leq C|x - x_0|^\alpha \quad (2.9)$$

O expoente de Hölder (α_p) é definido como:

$$\alpha_p(x_0) = \sup\{\alpha > 0 | f \in C^\alpha(x_0)\} \quad (2.10)$$

Um processo estocástico $X(t)$ é dito multifractal se possui incremento estacionário e satisfaz a equação (2.11):

$$E(|X(t)|^q) = c(q)t^{\tau(q)+1}, \forall t \in T, q \in Q \quad (2.11)$$

onde T e Q são intervalos de números reais, $\tau(q)$, função escala e $c(q)$, fator momento, são funções com domínio Q . Assume-se que T e Q possuem comprimentos não nulos e $0 \in T, [0,1] \subseteq Q$ [53].

Um processo multifractal é um processo que possui vários expoentes de Hölder, o que corresponde à seguinte propriedade:

$$X(t) = X(t + \Delta t) - X(t) \sim t^{\alpha(t)}, \quad (2.12)$$

Se existe apenas um expoente de Hölder, isto é, $\alpha(t) = \alpha$, o processo é dito monofractal com parâmetro de Hurst:

$$H = \frac{(\alpha+1)}{2} \quad (2.13)$$

A estrutura escala de um processo multifractal é muito mais rica que a autossimilar, possuindo múltiplos ou infinitos expoentes de Hölder [49]. A Figura 21 ilustra uma amostra de tráfego real e seu respectivo expoente de Hölder. Essa estrutura pode ser descrita estatisticamente com um espectro multifractal. Existem três formas de encontrar o espectro multifractal: O espectro de Hausdorff, o Espectro dos Grandes Desvios e o Espectro de Legendre [52]. Este último, mais simples e robusto, é o mais utilizado na análise de tráfegos multifractais. A Figura 17 ilustra o Espectro de Legendre referente ao tráfego da Figura 16.

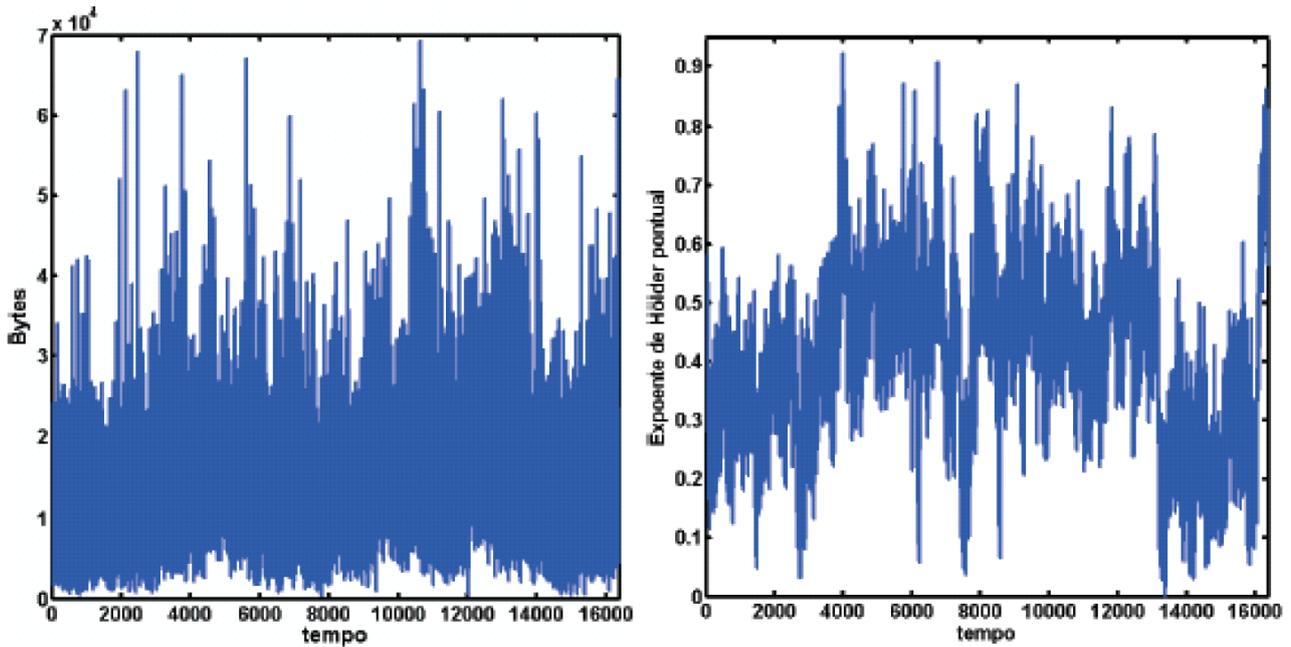


Figura 16 – Tráfego real e seu expoente de Hölder [28].

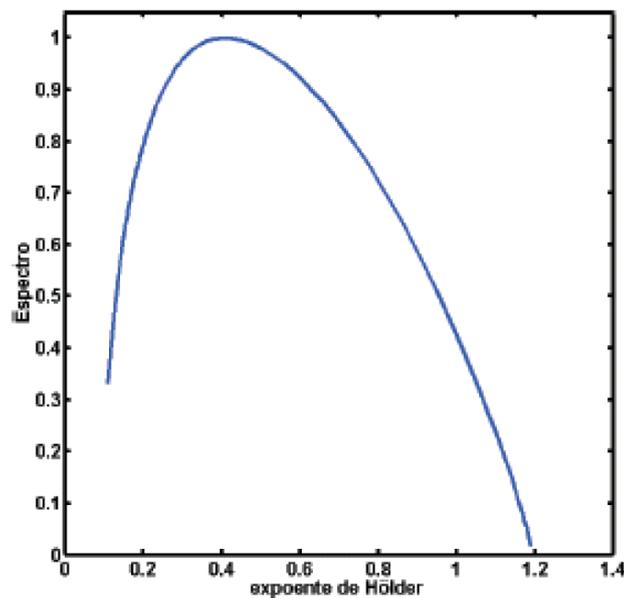


Figura 17 – Espectro de Legendre [28].

3.3.2 Multifractalidade do tráfego

Leeland [10], provocou uma ruptura com os antigos modelos poissonianos ao demonstrar que o tráfego Ethernet apresentava características como fractalidade e dependência de longa duração. Subsequentemente à essa observação, foram feitos vários estudos acerca da caracterização do tráfego e, a análise do tráfego em escalas pequenas

mostrou que o tráfego nas redes de pacotes não é exatamente autossimilar, não respeitando todos os rigores do modelo baseado no parâmetro de Hurst.

Características como a positividade do tráfego e a existência de correlações de curta duração são inconsistentes com o modelo exatamente autossimilar nas mais altas frequências. Nesse contexto, alguns estudos foram feitos e mostraram que, para pequenas escalas - na ordem de milissegundos ou menores - a modelagem multifractal é mais eficiente para caracterizar o tráfego das redes IP reais enquanto que nas escalas maiores, o tráfego é assintoticamente autossimilar [30], [34], [50], [51], [53], [54], [55].

A análise multifractal visa descrever o comportamento das singularidades de uma função de forma geométrica ou estatística, dessa maneira, como o parâmetro de autossimilaridade é oscilante em tráfegos reais, eles podem ser considerados multifractais. Como dito anteriormente, os processos autossimilares podem ser considerados monofractais e são descritos por um expoente de Hölder fixo, que equivale ao parâmetro de Hurst (Eq. 2.13). Dessa forma, os processo multifractais surgem como uma generalização dos processos autossimilares, permitindo regularidade e leis de comportamento em escala variantes no tempo, descrevendo melhor os processos irregulares presentes no tráfego [53]. A figura 18 ilustra uma comparação entre amostras de tráfegos em diferentes escalas, um para o caso real, um tráfego multifractal sintético e um autossimilar sintético.

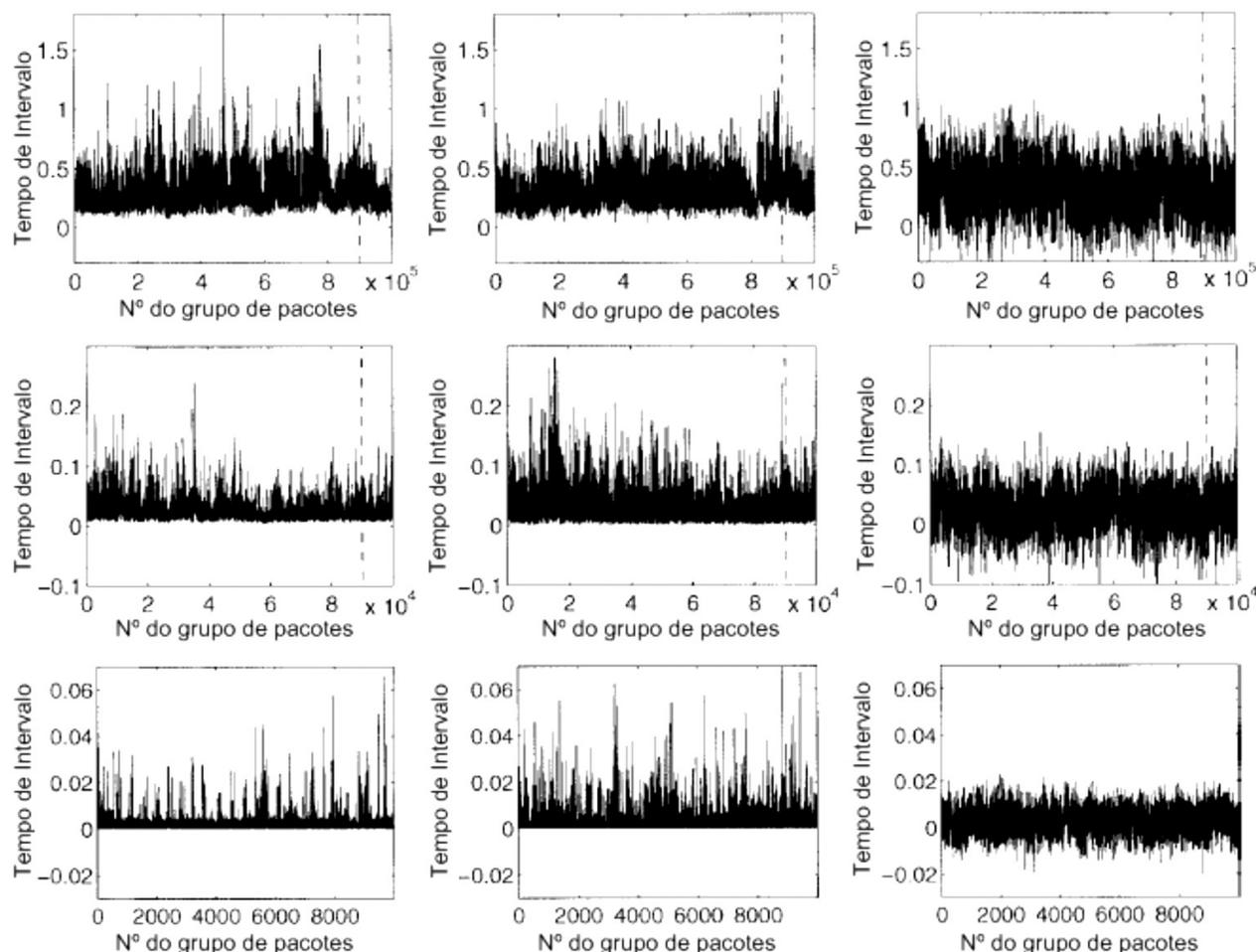


Figura 18 – a) Tráfego real b) Tráfego multifractal sintético c) Tráfego autossimilar sintético [58].

Estudos recentes apontam que as simulações de filas mostram que as flutuações nas escalas menores – descritas pelos modelos multifractais – provocam atrasos no tráfego nos baixos níveis de utilização da rede. Assim, a análise autossimilar pode ser usada para prever o tamanho médio das filas quando se tratar de alta utilização da rede, porém esta análise subestima o tamanho médio das filas no casos de baixa utilização [19].

Portanto, as características exibidas pelo tráfego nas baixas escalas podem afetar substancialmente o desempenho da rede para baixas e médias utilizações, enquanto que as características observadas nas escalas maiores são importantes nas utilizações média e alta da rede. Portanto, ambas as características apresentadas pelo tráfego em pequenas e grandes escalas são importantes e complementares na descrição do tráfego; assim, as análises multifractal e autossimilar possuem cada uma sua importância e aplicação. Como este trabalho trata de redes ópticas transparentes, implementando *backbones*, optou-se por considerar o parâmetro de Hurst (H) como entrada do classificador e indicador das características fractais do tráfego.

4 CLASSIFICADOR DE TRÁFEGO E SELECIONADOR DE PARADIGMA DE COMUTAÇÃO ÓPTICA

Os comutadores de borda das redes ópticas híbridas precisam tomar a decisão sobre qual paradigma de comutação óptica é o mais adequado à transmissão do tráfego entrante. Para que isso ocorra de forma eficiente e com transparência a protocolos, uma alternativa é analisar as características estatísticas do tráfego de entrada e classificá-lo como adequado a determinado tipo de comutação óptica. Algumas ferramentas de gerenciamento de tráfego como o SNMP (*Simple Network Management Protocol*) são limitadas em sua capacidade uma vez que apenas fornecem parâmetros estatísticos do tráfego agregado em uma janela de tempo [26]. Portanto, viabilizar essa análise *on-line*, diante da complexidade do tráfego, implica em estimar parâmetros estatísticos do tráfego, processo que traz consigo imprecisão com diversos graus de incerteza dependendo do procedimento escolhido para a estimativa. Além disso, por envolver parâmetros pertencentes a variáveis aleatórias com distribuições distintas, esse processo impreciso de estimação de tráfego resulta em um problema não-linear .

A constante evolução das aplicações faz com que o tráfego nas redes ópticas de transporte (*backbones*) tenha características dinâmicas. Portanto, a concepção de um mecanismo de estimação e classificação de tráfego precisa evitar limiares de classificação rígidos e dependência quanto a protocolos e aplicações. Além disso, precisa apresentar robustez e flexibilidade de modo a ser alterado com facilidade à medida em que as características de tráfego evoluem. A Figura 19 ilustra um modelo de classificador de tráfego que utiliza parâmetros estatísticos tais como, taxa média de chegadas (λ), tempo de interchegadas (Δt) e parâmetro de Hurst (H) para estimar e classificar o tráfego entrante.

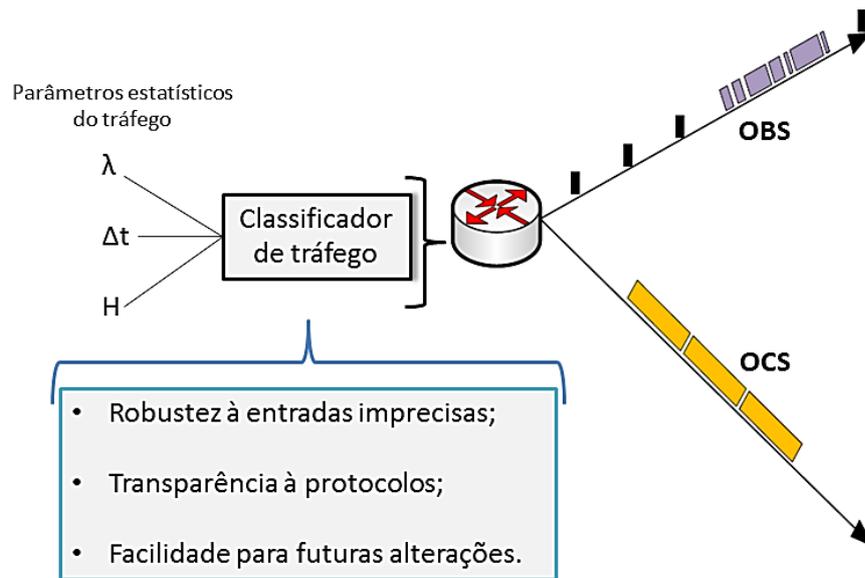


Figura 19 – Classificador de tráfego.

A Lógica Fuzzy é uma ferramenta que suporta modelos de processos bastante complexos, baseados em informações imprecisas ou aproximadas. A Teoria de Conjuntos Fuzzy e os A lógica Fuzzy (ou Nebulosa ou Difusa) é uma ferramenta que suporta modelos de processos bastante complexos, baseados em informações imprecisas ou aproximadas. A teoria de conjuntos Fuzzy e os conceitos de lógica Fuzzy podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Esta lógica, portanto, atende a todos os pré-requisitos exigidos para a implementação de um classificador de tráfego e selecionador de paradigma de comutação óptica e por esse motivo foi escolhida para desenvolver o classificador/selecionador proposto neste trabalho.

O presente Capítulo introduz os conceitos de lógica Fuzzy e apresenta o classificador de tráfego e selecionador de paradigma de comutação óptica, desenvolvido utilizando a ferramenta “toolbox Fuzzy” do *software* MATLAB. A fim de analisar o comportamento do classificador/selecionador com tráfegos de baixíssima granularidade, foram implementados dois modelos MATLAB, um primeiro com os três paradigmas de comutação óptica (OCS, OBS e OPS) e um segundo modelo apenas com os paradigmas OCS e OBS.

4.1 Lógica Fuzzy

A teoria dos conjuntos Fuzzy foi proposta em 1965 por Lofti Zadeh [57] e permaneceu incompreendida por muito tempo. Na década de 80, Mandami a utilizou para projetar controladores Fuzzy dando início a um grande progresso na área [58]. Embora existam outras ferramentas disponíveis, a lógica Fuzzy, em algumas situações, em especial, na solução de problemas não-lineares, apresenta soluções mais fáceis, com redução no tempo de desenvolvimento e menor carga computacional.

Segundo [59] o que diferencia a lógica Fuzzy da lógica booleana é a capacidade de se aproximar do mundo real onde não existe somente respostas extremas. A lógica Fuzzy considera as meias verdades e possibilita mensurar o grau de aproximação da solução exata diferentemente da lógica tradicional.

Segundo [58], uma das grandes vantagens da lógica Fuzzy é se aproximar da forma com que o raciocínio humano relaciona as informações buscando respostas aproximadas aos problemas, por isso o grande foco desta lógica é a solução de problemas cujas informações presentes sejam incertas. A ideia central da lógica Fuzzy é emular a psicologia humana, dessa forma essa ferramenta permite criar sistemas especialistas criando uma base de regras utilizando variáveis linguísticas, típicas da natureza humana. Por exemplo, na frase “Se estiver *quente*, ligarei o ar-condicionado no *máximo*”. *Quente* e *máximo* não correspondem a valores numéricos de temperatura e potência, respectivamente, mas podem corresponder a uma faixa de valores. O mesmo conceito linguístico pode, ainda, se referir a equipamentos distintos ou mesmo diferentes acepções para diferentes pessoas. Problemas como este, em que se dispõe apenas de uma descrição parcial e baseada em informações linguísticas podem ser resolvidos com a lógica Fuzzy baseada no conhecimento de um especialista. Dessa forma, um especialista (*expert*) humano cria uma base de conhecimento formando um banco de regras (Base de conhecimento) e uma máquina de Inferência deduz informações novas (Base de fatos) comparando uma entrada com as premissas das regras conforme ilustrado na Figura 20.

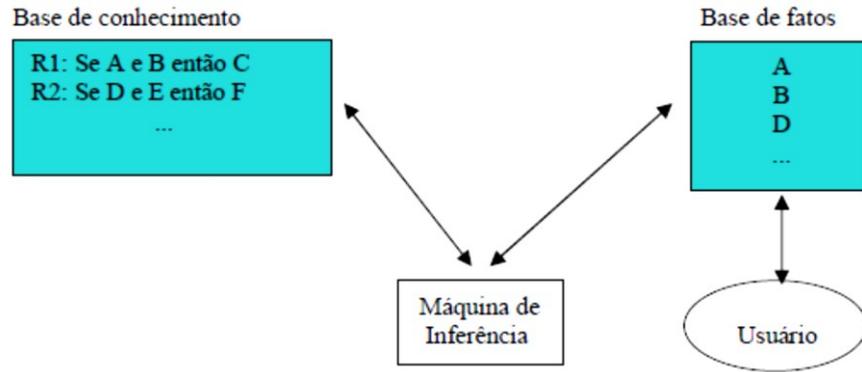


Figura 20 – Sistema especialista.

A máquina de Inferência é responsável por deduzir as informações novas ao comparar fatos com as premissas das regras. Nas aplicações em engenharia, como trabalha-se com números, para que as entradas numéricas sejam tratadas pela lógica Fuzzy é necessário convertê-las em variáveis linguísticas. Esse processo é denominado Fuzzificação. A aplicação das regras constante no banco de regras é a chamada Inferência enquanto que o processo para transformar a variável linguística de saída da máquina de Inferência em um valor numérico é chamado Defuzzificação. A Figura 21 ilustra um diagrama de blocos com as várias etapas de um sistema Fuzzy.

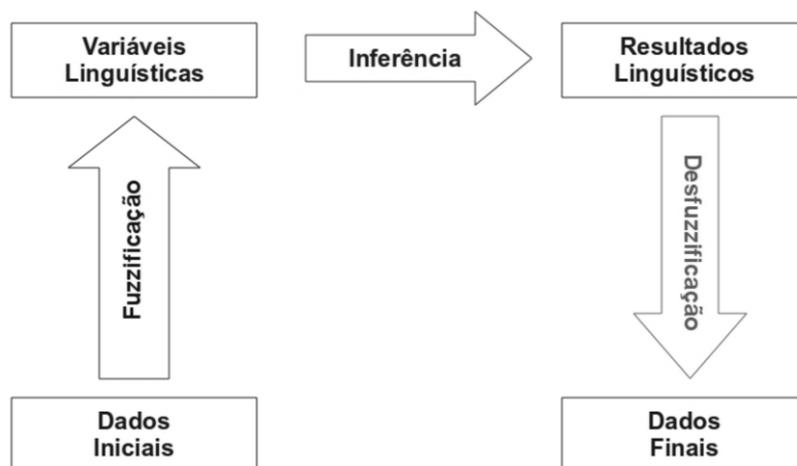


Figura 21 – Sistema Fuzzy.

Em geral, os problemas resolvidos por meio da lógica Fuzzy podem ser resolvidos por meio de outras ferramentas; no entanto, no caso de problemas não lineares, a lógica Fuzzy se mostra vantajosa, uma vez que dispensa a criação de modelos matemáticos complexos e exige apenas o conhecimento de um especialista no assunto. Dessa forma, um sistema Fuzzy permite implementar controladores não

lineares em que as regras de funcionamento são obtidas de especialistas. Por esse motivo a lógica Fuzzy foi escolhida para a elaboração do classificador de tráfego proposto neste trabalho. Uma vez que o classificador lida com estatísticas diferentes, que não podem ser somadas, o classificador é, portanto, um sistema não linear. Outros motivos, associados às características do tráfego, tornam a lógica Fuzzy vantajosa para fazer a classificação do tráfego, tais como:

- a) a evolução das aplicações – o uso da lógica Fuzzy permite que alterações sejam feitas de maneira rápida e simples, com a alteração de uma linha de comando, por exemplo, dispensando a necessidade de uma reanálise profunda das características do tráfego com o surgimento de novas aplicações e tornando o classificador independente da existência de modelos matemáticos fechados para caracterizar o tráfego;
- b) surgimento de novos protocolos – a análise baseada nos parâmetros estatísticos do tráfego torna o classificador transparente a protocolos;
- c) robustez – a lógica Fuzzy é robusta, dispensando entradas precisas, o que para a análise do tráfego é extremamente vantajosa, especialmente para a análise feita *on-line* com estimação dos parâmetros.

Além disso, a lógica Fuzzy permite a granulação do problema, possibilitando a escolha do nível de solução o que, na análise de tráfego implica que um tráfego particular pode ser adequado para a transmissão por dois paradigmas e, ainda assim, o sistema Fuzzy é capaz de lidar com paradoxos e gerar uma saída válida.

4.1.1 Fuzzificação

Nesta primeira etapa de um sistema lógico Fuzzy, o problema é analisado e os dados de entrada são transformados em variáveis linguísticas. Ou seja, valores numéricos são associados a valores linguísticos como “muito”, “pouco”, etc. Com esses valores, é criada uma função de pertinência (μ), uma função indicadora multivalente que associa os intervalos numéricos aos seus respectivos valores linguísticos. A Figura 22 a seguir ilustra um exemplo de função de pertinência para escolha do paradigma de comutação.

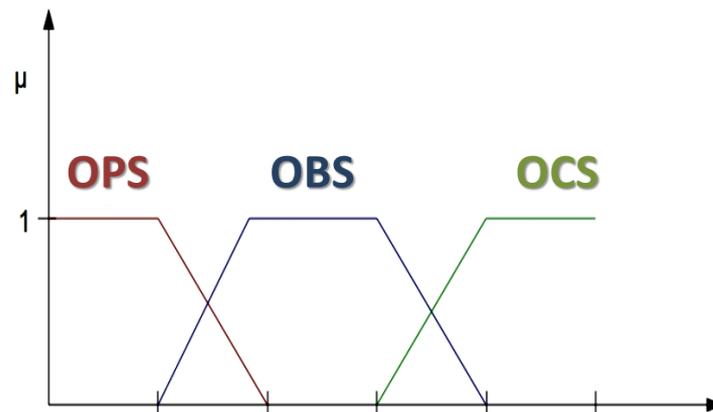


Figura 22 – Exemplo de função de pertinência.

4.1.2 Inferência

Esta etapa pode ser dividida em duas componentes: agregação e composição, conforme ilustrado na Figura 23. Agregação é feita através da condição colocada e a composição através do resultado relacionado a condição. Ambos os processos são feitos utilizando as variáveis linguísticas e criam um conjunto ou uma matriz de regras que são responsáveis pela tomada de decisão.

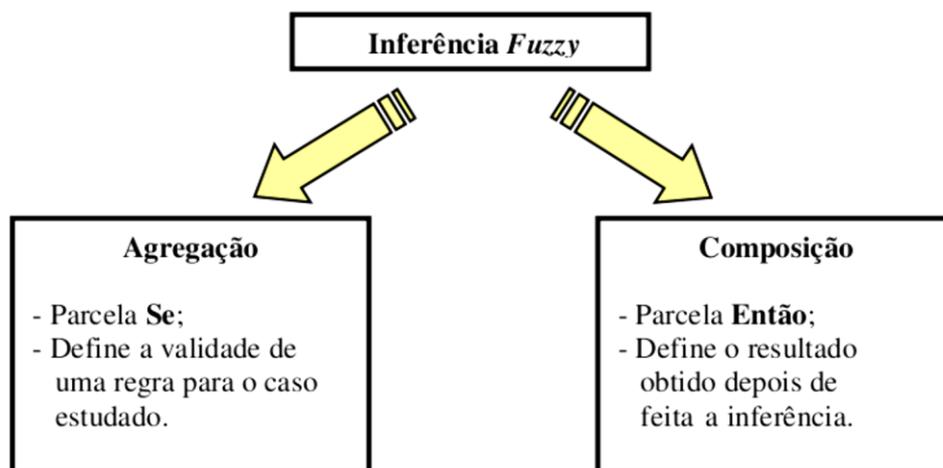


Figura 23 – Inferência Fuzzy [59].

4.1.3 Defuzzyficação

A Defuzzyficação é a etapa em que os valores Fuzzy obtidos da máquina de Inferência são convertidos em números reais, ou seja, obtém-se uma saída

matematicamente definida por meio de duas etapas: implicação e agregação. Utilizando-se do exemplo apresentado em [57] considere os conjuntos Fuzzy A, B e C produzindo uma variável de solução D, com entradas w, x e y:

Se w é W então D é A

Se x é X então D é B

Se y é Y então D é C

A Defuzzificação permite que o valor atual de D seja definido ponderando as três regras correspondentes às respectivas entradas, de acordo com os operadores Fuzzy escolhidos, dentre os quais destacam-se os seguintes:

A and B = $\min(a,b)$

A or B = $\max(a,b)$

not A = $1 - A$

O processo de Defuzzificação é feito sobre as funções de pertinência de saída, conforme ilustrado na Figura 24, que exibe a etapa de agregação segundo o operador $\max(a, b, c)$.

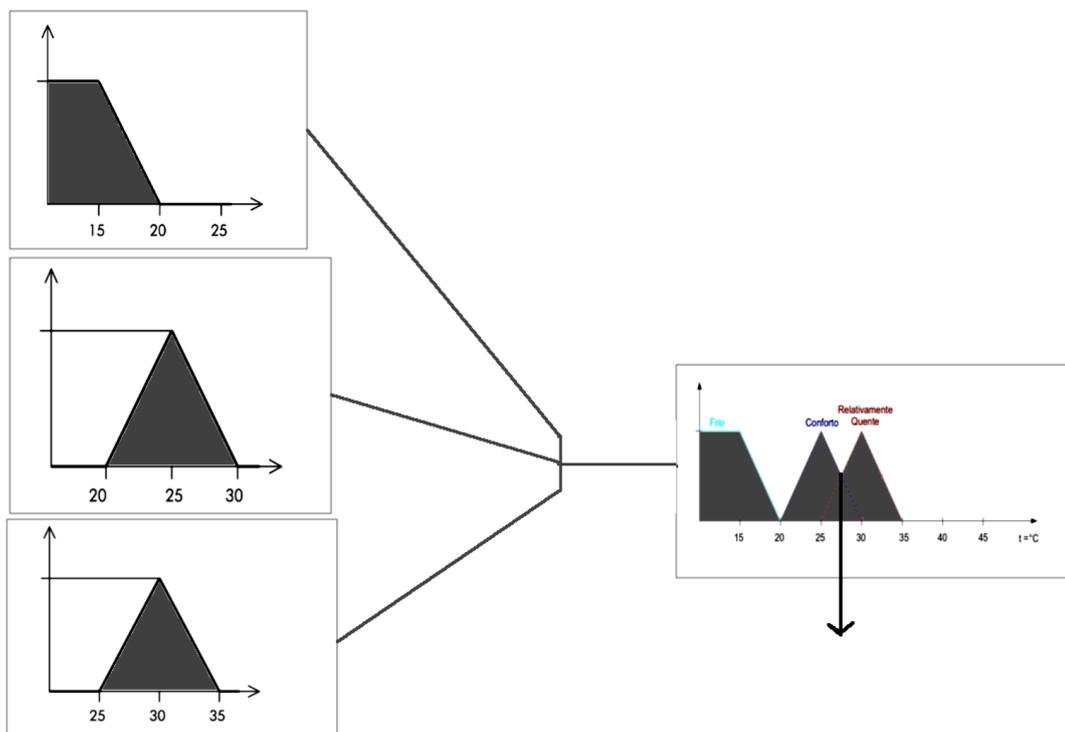


Figura 24 – Defuzzificação [57].

Existem diversas técnicas de Defuzzificação, que convertem as variáveis Fuzzy em valores numéricos aceitáveis, dentre as quais destacam-se as seguintes [57]: Centroide, *First-of-maxima*, *Middle-of-maxima* e Critério Máximo.

A técnica Centroide fornece como saída o centro de gravidade do conjunto Fuzzy. É a técnica mais simples de ser utilizada e por isso foi a escolhida para a elaboração deste trabalho.

4.2 Classificador de Tráfego e Seleccionador de Paradigma de Comutação Óptica

O classificador de tráfego e seccionador de paradigma de comutação óptica proposto, baseado em lógica Fuzzy, decide se o tráfego deve ser roteado utilizando comutação por rajadas (OBS) ou comutação por circuitos (OCS). O Classificador/Seleccionador foi modelado em MATLAB usando a ferramenta “toolbox Fuzzy”. Um primeiro modelo (Modelo 1) implementa os três paradigmas de comutação óptica na saída (OCS, OPS e OBS). Um segundo modelo (Modelo 2), apresenta como saída apenas os paradigmas de comutação OCS e OBS. Em ambos os casos, o Classificador/Seleccionador analisa os parâmetros do tráfego de entrada e define o paradigma de comutação óptica mais adequado. A Figura 25 ilustra o modelo do Classificador/Seleccionador incluindo o paradigma de comutação OPS. Embora a comutação OPS tenha a implementação prática menos viável atualmente, sua inclusão na saída do Modelo 1 do Classificador/Seleccionador foi feita apenas para análise do comportamento do mesmo diante de tráfegos de baixíssima granularidade. O Modelo 2 do Classificador/Seleccionador foi incorporado a uma ferramenta de simulação de eventos discretos desenvolvida para análise de desempenho e estudo de redes ópticas transparentes, o TONetS (*Transparent Optical Network Simulator*) [64], de modo a permitir um estudo sobre o desempenho de redes ópticas híbridas OCS/OBS. O detalhamento e os resultados da alteração na ferramenta TONetS serão feitos no próximo Capítulo desta dissertação.

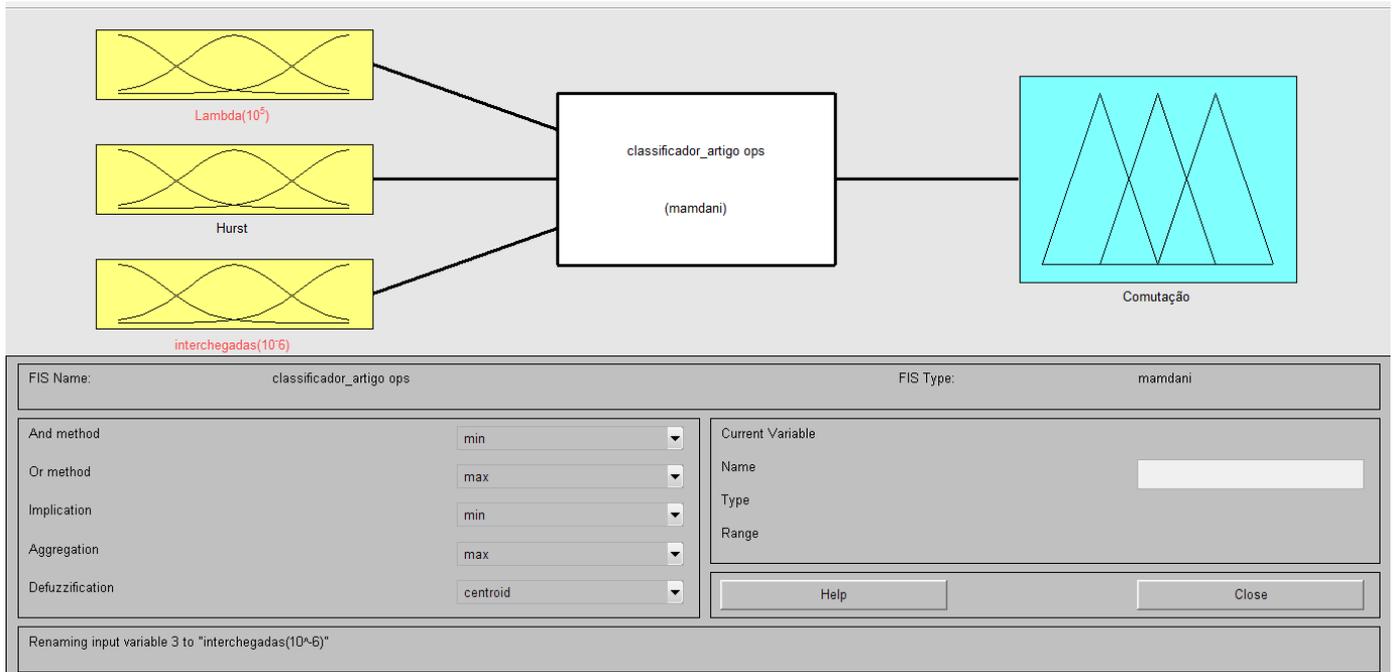


Figura 25 – Classificador/selecionador baseado em lógica Fuzzy – Modelo 1.

4.2.1 Classificador/selecionador - Fuzzificação

As funções de pertinência das entradas e saídas do Classificador/Selecionador foram criadas considerando o comportamento esperado da rede, a análise de *traces* de tráfego disponíveis na literatura e informações sobre as taxas e tráfegos atuais [9], [10], [15], [23], [24], [25], [26], [60], [61] e [62].

A entrada correspondente à **taxa de chegada** de pacotes na rede para ambos os modelos - ilustrada na Figura 26 - considera **baixa** as taxas de chegada de pacotes inferiores a 4×10^5 pacotes/segundo; **média**, taxas entre 3×10^5 pacotes/segundo e 5×10^5 pacotes/segundo; e **alta**, taxas superiores a 4×10^5 pacotes/segundo.

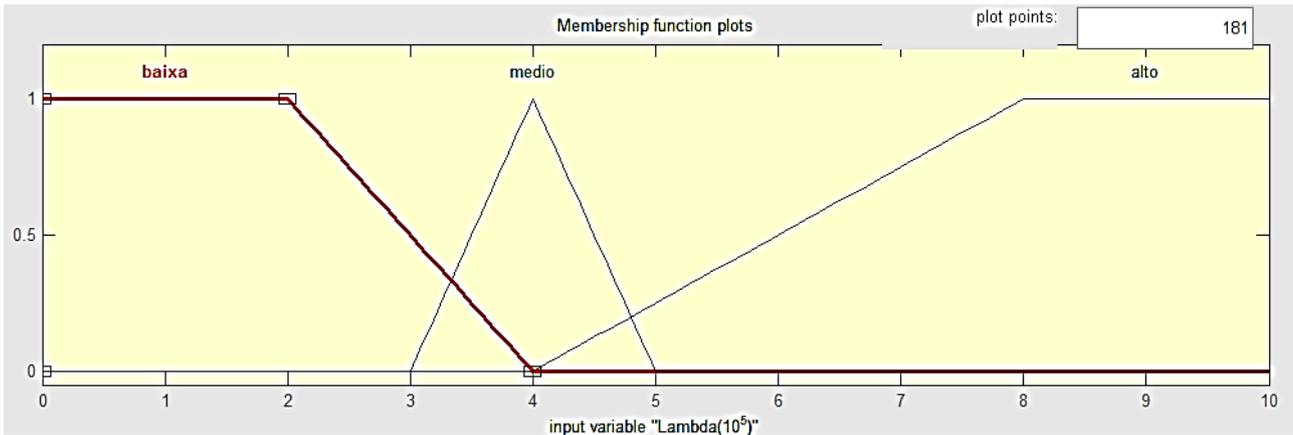


Figura 26 – Classificador/Selecionador – Entrada λ (tela extraída do MATLAB).

A entrada correspondente ao tempo de interchegadas de pacotes – Fig. 27 – considera **baixa**, interchegadas inferiores a $3\mu\text{s}$; **média**, interchegadas entre $2\mu\text{s}$ e $4\mu\text{s}$; e, **alta**, interchegadas superiores à $3,5\mu\text{s}$.

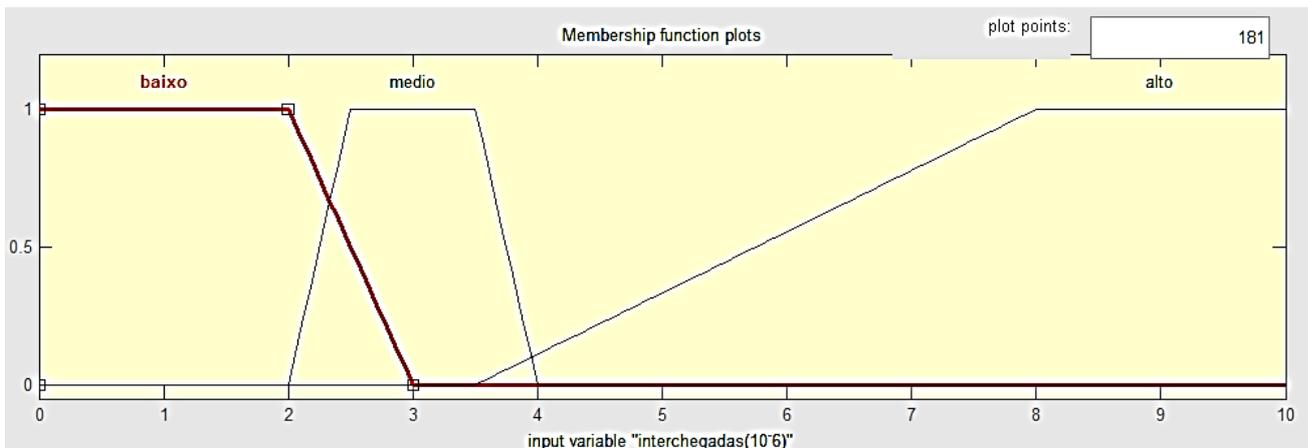


Figura 27 – Classificador/Selecionador – Entrada Δt (tela extraída do MATLAB).

A entrada correspondente ao **parâmetro de Hurst** foi feita de duas formas, uma para o Modelo 1 do Classificador/Selecionador, contendo a saída OPS, e outra para o Modelo 2, contendo apenas as saídas OBS e OCS. Uma vez que o Modelo 1 não foi implementado em nenhuma ferramenta computacional neste trabalho, optou-se por utilizar uma função *gbell* na entrada correspondente ao parâmetro de Hurst. A função de pertinência *gbell* utilizada nessa etapa de Fuzzyficação, por ser uma função gaussiana, em geral permite modelar melhor características observáveis na natureza. Todavia sua implementação em sistemas de controle exige um custo computacional alto. Por esse motivo, a função *gbell* costuma ser substituída por uma função

trapezoidal para viabilizar implementações mais simples e rápidas. Neste trabalho, particularmente, a velocidade é um fator crítico e por esse motivo o Modelo 2, que foi incorporado a uma ferramenta computacional, foi elaborado com uma função de pertinência do tipo trapezoidal. A entrada correspondente ao parâmetro de Hurst do Modelo 1 – Figura 28 – considera o tráfego **poissoniano** para valores inferiores a 0,55; **híbrido**, para uma função de pertinência gaussiana (*gbell*) centrada em 0,55; e, **autossimilar** para valores superiores à 0,55.

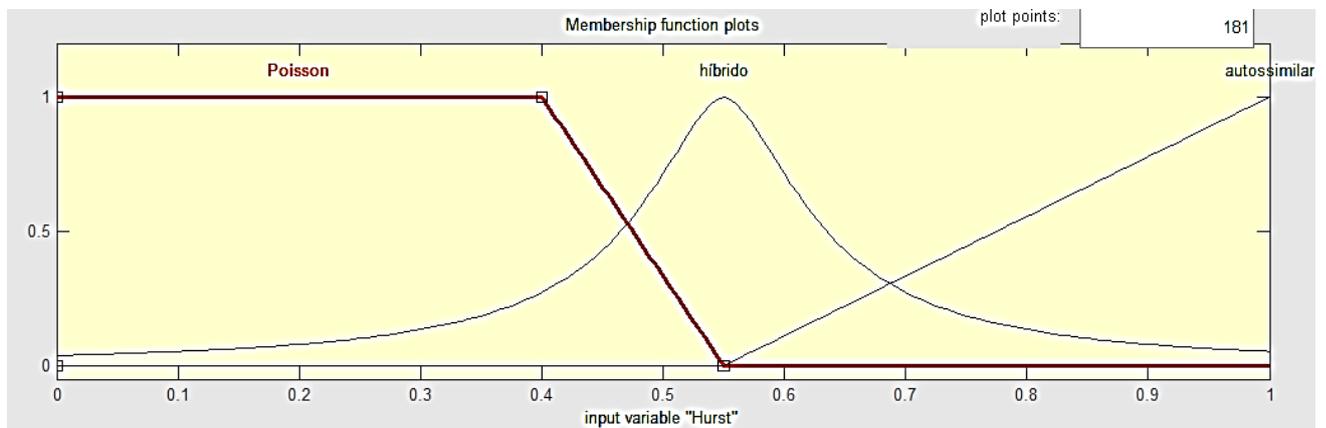


Figura 28 – Classificador/Selecionador baseado em lógica Fuzzy – Entrada H, Modelo 1 (extraída do MATLAB).

No caso do Modelo 2 do Classificador/Selecionador, a função de pertinência adotada foi uma função triangular de 0,4 a 0,6 a fim de facilitar a inclusão do módulo Classificador/Selecionador no simulador TONetS. A entrada correspondente ao **parâmetro de Hurst** do Modelo 2 proposto está ilustrada na Figura 29.

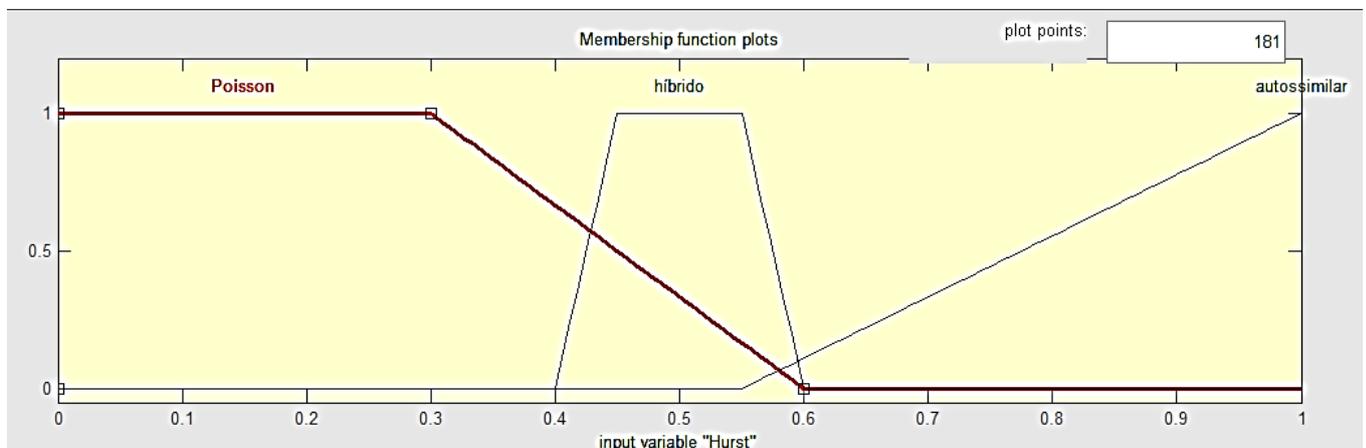


Figura 29 – Classificador/Selecionador baseado em lógica Fuzzy – Entrada H, Modelo 2 (tela extraída do MATLAB).

A **Saída** do Classificador/Selecionador é adimensional e está em uma escala de 0 a 1. A Figura 30 ilustra a **Saída** do Classificador/Selecionador no caso do Modelo 1 proposto onde, para valores inferiores a 0,3, o tráfego de entrada é considerado mais adequado à **comutação OPS**; para valores de 0 a 0,7, o tráfego é considerado mais adequado à **comutação OBS** e para valores superiores a 0,5, o tráfego é considerado mais adequado à **comutação OCS**.

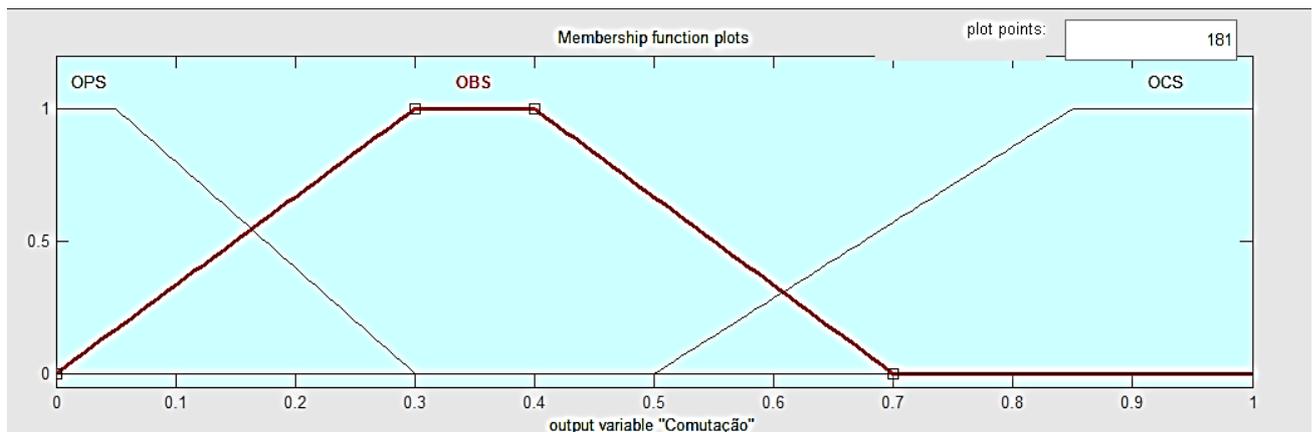


Figura 30 – Classificador/Selecionador baseado em lógica Fuzzy – Saída, Modelo 1 (tela extraída do MATLAB).

A Figura 31 ilustra a **Saída** do Modelo 2 proposto onde, para valores de 0 a 0,7, o tráfego é considerado mais adequado à **comutação OBS** e para valores superiores a 0,5, o tráfego é considerado mais adequado à **comutação OCS**.

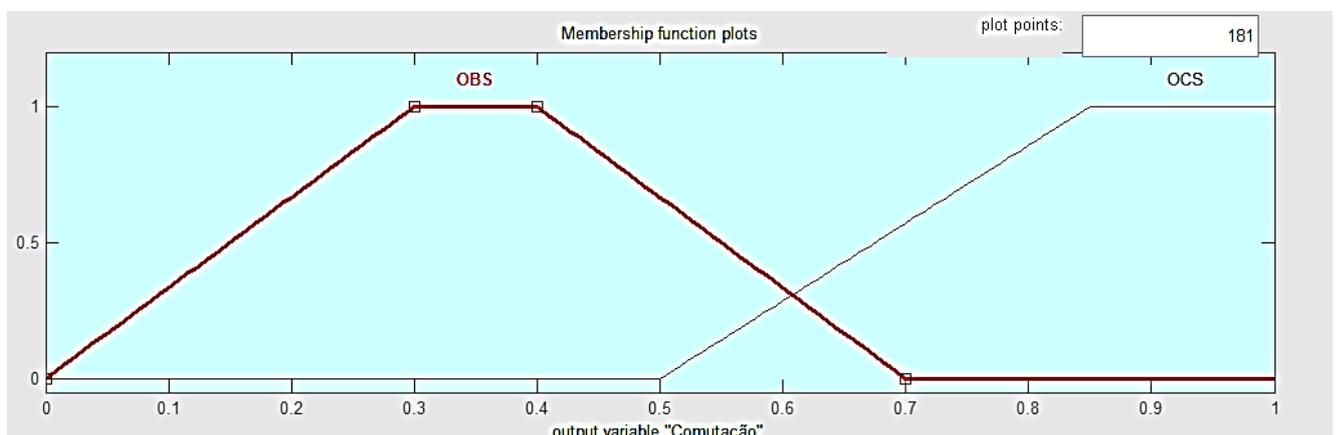


Figura 31 – Classificador/Selecionador baseado em lógica Fuzzy – Saída, Modelo 2 (tela extraída do MATLAB).

4.2.2 Classificador/Selecionador - Inferência

Nessa fase, foi criada a matriz de regras do Classificador/Selecionador. A elaboração das regras considerou o fato de que quanto maior for a variação entre o **tempo de chegadas de pacotes (Δt)**, maiores são os intervalos em que a fibra óptica fica ociosa; quanto maior for o **parâmetro de Hurst (H)**, maior é a autossimilaridade do processo e quanto maior for a **taxa de chegadas de pacotes (λ)**, maior é o volume de tráfego.

Cada regra de inferência leva em consideração o efeito conjunto das combinações possíveis de cada estado das variáveis de Entrada do Classificador/Selecionador. Por exemplo, uma carga média, autossimilar e com o tempo de interchegadas muito esparsos pode ser comutada utilizando OPS ou OBS de acordo com o quão autossimilar é o tráfego ou mesmo em que grau esse tráfego se aproxima do valor da taxa de chegada de pacotes considerada como médio absoluto. A ponderação dos graus de verdade é feita pelas funções de pertinência mas deve ser considerada na elaboração de cada regra.

A matriz de regras de inferência utilizada neste trabalho foi dividida em três submatrizes conforme descrito na Tabelas 2. No caso do Modelo 2, com saídas OBS e OCS apenas, as saídas OPS foram substituídas por OBS, o resto da matriz de regras permanece inalterada.

Tabela 2 – Matriz de regras do Classificador/Selecionador.

a) Δt Baixo

Parâmetro de Hurst (H)	Taxa de chegada de pacotes (λ)		
	Baixa	Média	Alta
Poisson	OBS	OCS	OCS
Híbrido	OCS	OCS	OCS
Autossimilar	OBS	OCS	OCS

b) Δt Médio

Parâmetro de Hurst (H)	Taxa de chegada de pacotes (λ)		
	Baixa	Média	alta
Poisson	OBS	OCS	OCS
Híbrido	OBS	OCS	OCS
Autossimilar	OBS	OBS	OCS

c) Δt Alto.

Parâmetro de Hurst (H)	Taxa de chegada de pacotes (λ)		
	Baixa	Média	alta
Poisson	OPS	OBS	OCS
Híbrido	OPS	OBS	OBS
Autossimilar	OBS	OBS	OCS

4.2.3 Classificador/Seletor - Defuzzificação

O método escolhido para a etapa de Defuzzificação foi o Método do Centróide. Optou-se por ele devido à sua simplicidade e ao fato dele representar uma média ponderada das Entradas pela sua respectiva função de pertinência. A Saída calculada dessa forma corresponde, portanto, a uma solução de compromisso pesando todas as variáveis de Entrada. Nos casos em que o tráfego de entrada pode ser comutado por mais de um paradigma, ou seja nos valores em que um sistema não Fuzzy gerariam um paradoxo, o classificador foi elaborado de forma a priorizar a QoS e portanto, sempre apresenta a saída que consome mais recursos, ou seja, nos casos de paradoxo a saída OBS é escolhida ao invés de OPS e OCS ao invés de OBS.

Após a determinação das regras e das funções de pertinência, a ferramenta MATLAB cria uma superfície de controle, relacionando as Entradas e Saídas do sistema Fuzzy. Para a criação dessa superfície, o MATLAB faz uma aproximação linear dos pontos, o que por vezes oculta algumas não-linearidades das regras. As superfícies de controle geradas para os dois modelos propostos estão ilustradas na Figura 32.

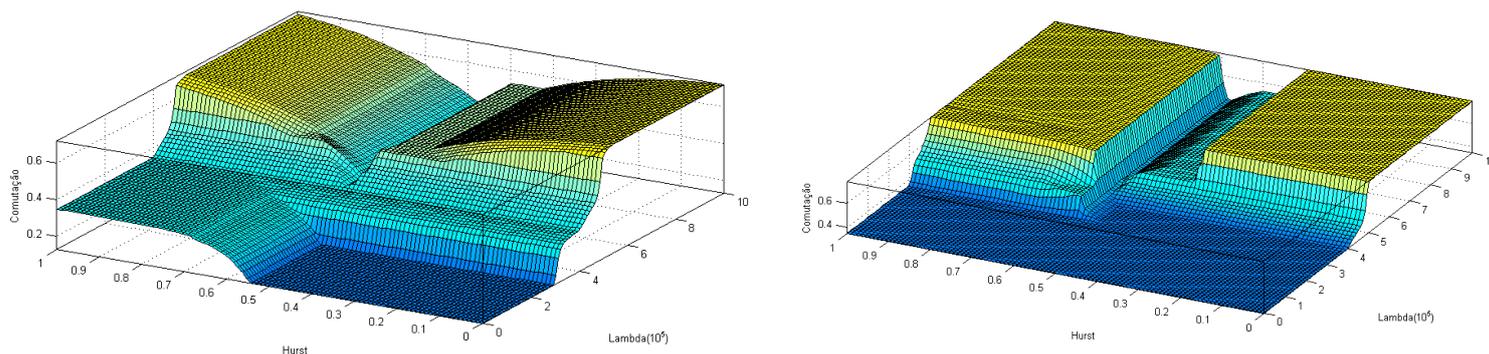


Figura 32 – Superfícies de controle do Classificador/Selecionador. Modelo 1 à esquerda e Modelo 2 à direita (tela extraída do MATLAB).

Nota-se que a superfície de controle obtida para o Modelo 1 do Classificador/Selecionador é mais suave e apresenta três patamares bem definidos, enquanto que a superfície de controle do Modelo 2 do Classificador/Selecionador apresenta 2 patamares mais evidentes. Isso decorre da inclusão da Saída OPS no Modelo 1 e do uso da função de pertinência *gbell*, que suaviza a Saída.

Cada patamar (Fig. 32) corresponde às combinações de entradas em que o paradigma de comutação adequado é único e bem definido, ou seja, corresponde às situações em que as características do tráfego são mais extremas. As curvas entre os patamares, são as regiões em que a análise dos parâmetros estatísticos em conjunto é mais importante, pois exige uma solução de compromisso e ponderação entre eles, sendo, portanto, a parte da superfície de controle que mostra que o uso da lógica Fuzzy é mais interessante do que o uso de limiares fixos para a decisão dos paradigmas de tráfego. O trabalho apresentado em [67] deixa em aberto a necessidade de um método para a decisão de paradigmas nas situações em que as características do tráfego não são extremas.

O Classificador/Selecionador proposto neste trabalho é robusto e tem caráter generalista, produzindo saídas válidas tanto nas situações em que características do tráfego extremas não deixam dúvidas quanto ao paradigma adequado para a comutação do tráfego analisado, como nas situações em que a análise conjunta das características do tráfego e a tomada de decisão sobre qual é a característica mais relevante para a decisão do paradigma de transmissão do tráfego de entrada tornam-se mais complexas.

4.3 Considerações sobre a modelagem do Classificador/Selecionador

As características da lógica Fuzzy a tornam uma ferramenta adequada para a análise dos parâmetros estatísticos do tráfego e sua classificação, determinando o paradigma adequado de comutação. Modelos de limiares fixos baseados no tamanho do tráfego entrante [6], por exemplo, não consideram outras características estatísticas em conjunto, como por exemplo a autossimilaridade, o que pode provocar equívocos na determinação do paradigma de comutação. Por exemplo um tráfego intenso e muito autossimilar, pode ser visto como um tráfego curto, uma vez que seu alto grau de similaridade implica na presença de muitas rajadas e, portanto, dados concentrados em grupos intervalados mas que podem exigir muita largura de banda. A análise baseada somente na continuidade do tráfego, o classificaria como adequado ao paradigma OBS o que pode implicar em um erro, uma vez que a montagem da rajada provavelmente não englobaria todos os pacotes pertencentes ao intervalo analisado, uma vez que o limiar baseado no comprimento temporal do tráfego é transparente à autossimilaridade prejudicando a qualidade de serviço. Um tráfego deste tipo é observável em aplicações como VoIP (voz em pacotes IP) que, quando visto como tráfego agregado, corresponde a um processo com dependência de longa duração, com alta taxa de bits e exige alta qualidade de serviço [63].

5 AVALIAÇÃO DO CLASSIFICADOR/SELECIONADOR DE PARADIGMAS

Este Capítulo é dedicado aos estudos com vistas a uma prova de conceito do Classificador/Selecionador proposto. Os estudos foram feitos submetendo-o a tráfegos disponíveis na literatura [10, 11, 23, 62, 63]. Com o Classificador/Selecionador integrado à ferramenta de simulação TONetS, [64] foi feita uma análise de desempenho comparando redes ópticas operando com um único paradigma de comutação (OCS ou OBS) com a rede óptica híbrida OCS/OBS.

Neste Capítulo, inicialmente é apresentado brevemente o simulador TONetS e a forma como o Classificador/Selecionador foi integrado a este simulador e, em seguida, os estudos envolvendo o funcionamento e o desempenho do Classificador/Selecionador proposto neste trabalho.

5.1 Ferramenta de simulação TONetS (*Transparent Optical Network Simulator*)

O desenvolvimento da ferramenta de simulação TONetS foi iniciado em 2006 com o objetivo de dar suporte a estudos de redes ópticas transparentes, considerando em um mesmo cenário, aspectos como: o problema do RWA, estratégias de sobrevivência, arquiteturas e estratégias de conversão de comprimento de onda e políticas para reduzir injustiças no atendimento de requisições [64].

TONetS é uma ferramenta de simulação de eventos discretos para avaliação de desempenho de redes ópticas transparentes, desenvolvido na linguagem de programação JAVA devido às suas características de portabilidade, orientação a objeto e disponibilidade de bibliotecas bem documentadas, tornando a ferramenta flexível e escalável. Essas características facilitaram a inserção do Classificador/Selecionador, proposto neste trabalho, ao TONetS, estendendo suas funcionalidades para estudos de desempenho de redes híbridas OBS/OCS de acordo com parâmetros estatísticos do tráfego de entrada.

5.1.1 Funcionamento do TONetS

Para a realização de uma simulação básica com o TONetS, o usuário precisa definir parâmetros como topologia, número de comprimentos de onda e estratégias de otimização de recursos que serão simuladas.

O TONetS foi desenvolvido, inicialmente, para comutação óptica por circuitos (OCS), dessa forma, a demanda de tráfego é composta por requisições de circuitos ópticos entre os pares origem-destino gerados. A geração de requisições de circuitos ópticos é um processo poissoniano de taxa média λ e o tempo médio de retenção dos circuitos é distribuídos exponencialmente com média $1/\mu$. A intensidade de tráfego, medida em Erlangs, é dada por $\sigma=\lambda/\mu$. A Figura 33 ilustra um exemplo de topologia de rede com 5 nós representados por círculos. É importante notar que um dado nó pode requisitar uma conexão para qualquer nó destino.

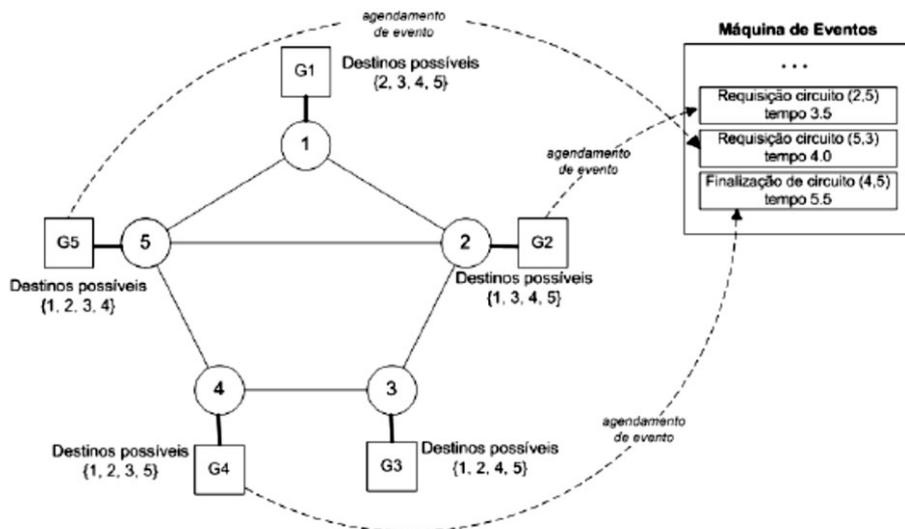


Figura 33 – Agendamento de eventos no TONetS [64].

O número mínimo de requisições de circuitos ópticos a serem executadas até o fim da simulação deve ser escolhida pelo usuário. O bloqueio de uma requisição ocorre se, no tempo associado ao evento de requisição, não for possível estabelecer um circuito óptico por falta de recursos. Caso contrário, a conexão (i.e., o circuito óptico) é estabelecida e os recursos ficam alocados a essa conexão até o seu término, quando ocorre a liberação do circuito.

5.1.2 Integração do Classificador/Selecionador ao TONetS

A integração do Classificador/Selecionador ao TONetS exigiu, primeiramente, o desenvolvimento de uma extensão para acrescentar a funcionalidade OBS ao TONetS. A adequação do TONetS ao paradigma OBS foi feita alterando-se a máquina de eventos do simulador, segundo o protocolo JET (*Just-Enough-Time*) [20] e supondo a existência de uma rede de controle paralela de capacidade infinita para o envio e processamento dos pacotes de controle associados às rajadas. Dessa forma, o canal de controle pode ser considerado livre de contenções ou tem perdas muito pequenas, e a velocidade de processamento das unidades de controle dos nós é considerada grande o suficiente de modo que perdas de rajadas só ocorrem devido à não solução de contenções nos canais de dados [4]. A validação da implementação OBS no TONetS foi feita por comparação com os resultados apresentados em [65].

Uma vez determinados os nós origem-destino de uma requisição OBS, os recursos são ocupados fim a fim, simulando a reserva de recursos promovida pelo pacote de controle e são liberados enlace a enlace, após o tempo de passagem das rajadas [68]. Dessa forma, o paradigma OBS libera os recursos entre os nós intermediários da rede mais rapidamente, que ficam disponíveis para novas requisições feitas por qualquer outro par origem-destino, otimizando a utilização da rede e melhorando o seu desempenho no caso de cargas de tráfegos de maior granularidade. A Figura 34 ilustra o funcionamento do TONetS com a extensão OBS.

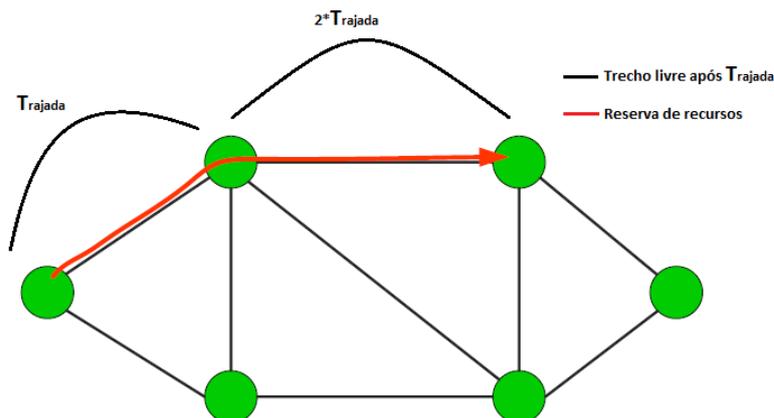


Figura 34 – Reserva e liberação dos recursos no TONetS estendido.

A fim de facilitar a implementação da rede híbrida OCS/OBS no TONetS e considerando fatores de desempenho como o tempo de estabelecimento de caminhos ópticos, optou-se por utilizar a arquitetura de rede óptica híbrida paralela. Dessa forma,

o Classificador/Selecionador é alocado nos nós de borda e, de acordo com as características estatísticas do tráfego de cada requisição, o Classificador/Selecionador encaminha a requisição de conexão para a rede OCS ou para a rede OBS. A Figura 35 ilustra o funcionamento do TONetS após a inclusão do Classificador/Selecionador.

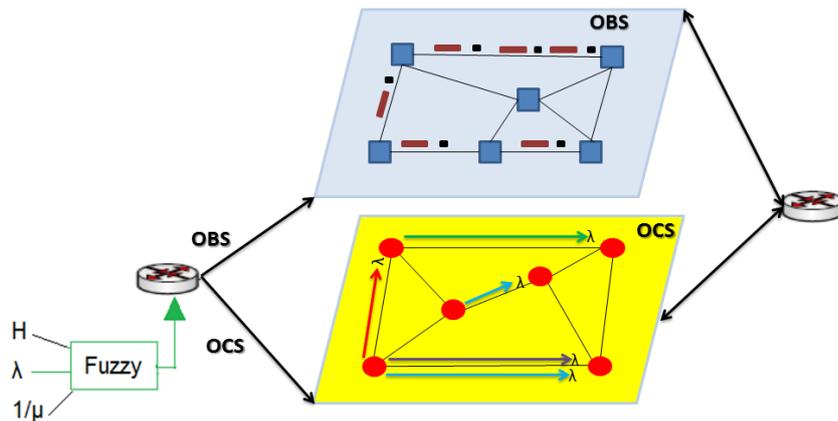


Figura 35 – Funcionamento do TONetS com o Classificador de tráfego.

5.2 Verificação do funcionamento do Classificador/Selecionador.

A verificação do funcionamento do Classificador/Selecionador foi feita através de experimentos usando tráfegos (i.e., *traces*) disponíveis na literatura [23]. A obtenção de *traces* para a caracterização do tráfego não é uma tarefa trivial, uma vez que encontra barreiras como custos e políticas de privacidade das operadoras e, portanto, é frequente diversos estudos utilizarem *traces* obtidos em universidades ou cenários específicos [10, 11, 61, 62]. Dessa forma, foram utilizados *traces* analisados em estudos sobre a autossimilaridade do tráfego e que, portanto, já possuíam o valor do parâmetro de Hurst estimado, uma vez que o estudo e análise dos métodos para estimar o valor de H não são foco deste trabalho.

5.2.1 Experimento 1 (Tráfego Ethernet)

O Experimento 1 com o Classificador/Selecionador consistiu na verificação do seu funcionamento, aplicando-se 12 diferentes *traces* de tráfego Ethernet na sua entrada e observando-se sua saída. Para isso utilizou-se dados de um tráfego Ethernet em rede local (LAN), com características autossimilares marcantes, coletado entre

agosto de 1989 e fevereiro de 1992 conforme descrito em [10]. Embora se trate de um tráfego relativamente antigo, sua análise quando comparada a tráfegos mais recentes permite ilustrar a evolução do tráfego em redes de comunicação de dados ao longo dos anos, observável nos parâmetros estatísticos do tráfego, o que torna o uso da lógica Fuzzy para classificar o tráfego ainda mais interessante. O tráfego Ethernet utilizado neste experimento foi objeto de diversos estudos, principalmente em função da natureza particular dos congestionamentos causados por tráfegos autossimilares, que difere muito do congestionamento assumido por tráfegos poissonianos. A Figura 36 ilustra uma série temporal característica desse tráfego Ethernet de referência.

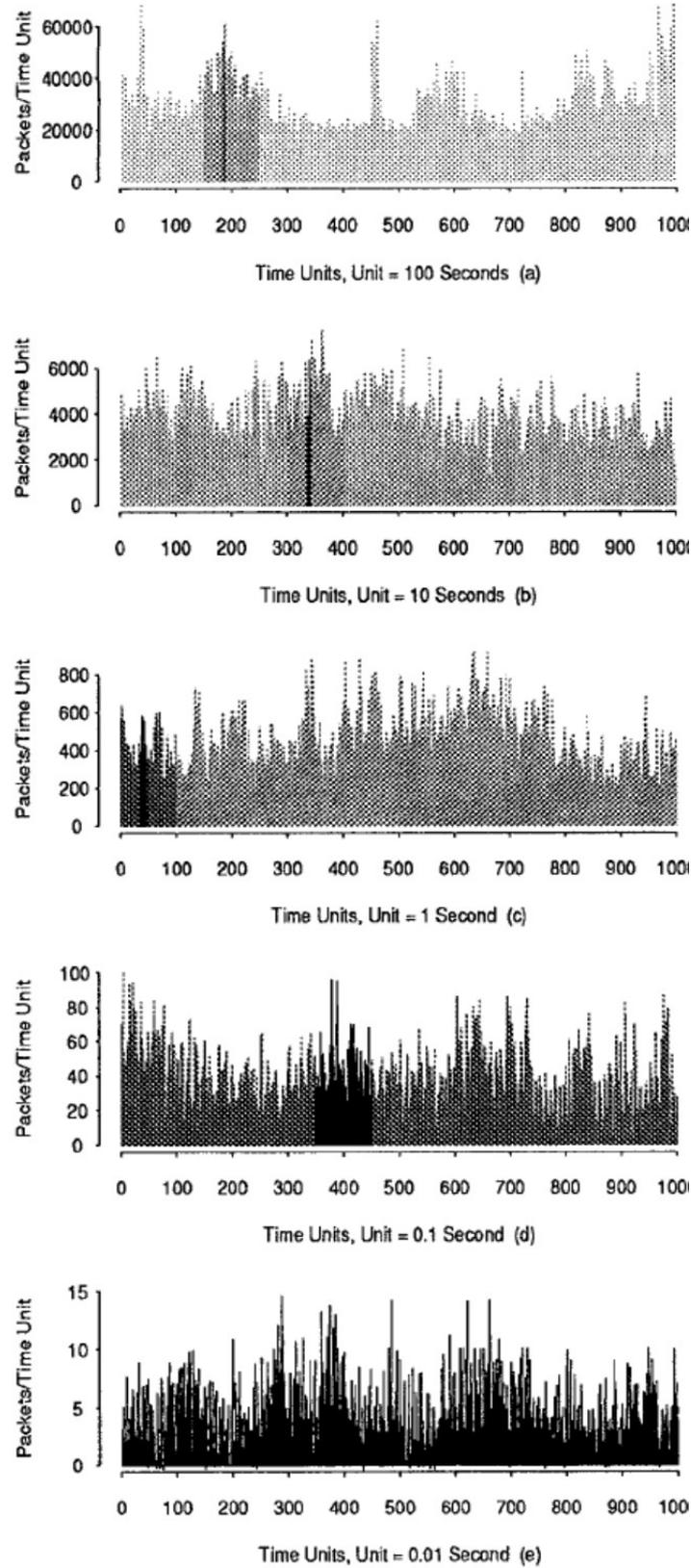


Figura 36 – Série temporal do tráfego Ethernet (pacotes por unidade de tempo) em 5 escalas temporais. Diferentes tons de cinza são utilizados para identificar o mesmo segmento do tráfego em escalas temporais distintas [10].

O funcionamento do Classificador/Selecionador foi analisado segundo as suas diferentes modelagens: Modelo 1, incluindo os paradigmas OCS, OBS e OPS e Modelo 2 (versão inserida no TONetS) com apenas os paradigmas OCS e OBS.

A Tabela 5 apresenta os resultados na saída do Classificador/Selecionador em termos do paradigma de comutação óptica esperado e obtido para cada *trace* do tráfego Ethernet de referência [10]. Por razões de simplicidade (i.e., espaço), os resultados do Modelo 1 estão referenciados na Tabela 5 como “OPS”, a principal diferença entre os modelos.

Tabela 3 – Características do tráfego Ethernet utilizado para validação do Classificador/Selecionador [10].

	Tráfego	Duração (s)	Total de pacotes	λ médio (pcts/s)	Δt médio (s)	Parâmetro de Hurst	Saída Esperada modelo 2	Saída Obtida modelo 2	Saída Esperada modelo 1	Saída Obtida modelo 1
ago/89	baixa carga (6h25-7h25)	3600	652909	181,3636	0,005513785	0.95	OBS	OBS	OPS	OPS
	carga normal (14h25-15h25)	3600	968631	269,0642	0,003716586	0.9	OBS	OBS	OBS	OBS
	carga pesada (16h25-17h25)	3600	1404444	390,1233	0,002563292	0.9	OBS	OBS	OBS	OBS
out/89	carga baixa (2h-3h)	3600	978911	271,9197	0,003677556	0.9	OBS	OBS	OBS	OBS
	carga normal (17h-18h)	3600	1359656	377,6822	0,002647729	0.86	OBS	OBS	OBS	OBS
	carga pesada (11h-12h)	3600	2141245	594,7903	0,001681265	0.97	OBS	OBS	OBS/OPS	OBS
jan/90	carga baixa (20h32-21h32)	3600	310038	86,12167	0,01161148	0.74	OBS	OBS	OPS	OPS
	carga normal (9h32-	3600	643451	178,7364	0,005594832	0.92	OBS	OBS	OPS	OPS

	10h32)									
	carga pesada (10h32-11h32)	3600	1391718	386,5883 333	0,002586731	0.98	OBS	OBS	OBS	OBS
fev/92	carga baixa (1h21-2h21)	3600	5681143 5	15780,95 417	6,33675E-05	0.75	OBS	OBS	OBS	OBS
	carga normal (20h21-21h21)	3600	1546261 59	42951,71 083	2,3282E-05	0.94	OCS	OCS	OCS	OCS
	carga pesada (11h21-12h21)	3600	2250667 41	62518,53 917	1,59953E-05	0.99	OCS	OCS	OCS	OCS

Observa-se na Tabela 5 que, na maioria dos casos, o paradigma mais adequado à comutação do tráfego é o OBS, exceto nos casos em que o tráfego é muito autossimilar e apresenta baixíssimos tempos de interchegadas aliados a altas taxas de chegadas de pacotes. Nesses últimos casos, representados pelo dois últimos *traces* de fev/92, observa-se que a saída do Classificador/Selecionador indica que o paradigma mais apropriado é o OCS.

Uma das razões para este resultado pode ser atribuída ao fato de que, as funções de inferência do Classificador/Selecionador tiveram seus intervalos definidos em funções de tráfegos mais recentes [23], e que os *traces* estudados, mesmo em períodos de carga elevada, apresentam baixas taxas de chegada de pacotes, quando comparadas às taxas observadas atualmente.

O resultado é coerente também pelo fato de que na época em que os *traces* do tráfego Ethernet foram obtidos, serviços de voz em pacotes em tempo real (e.g., VoIP), que exigem elevada QoS e, portanto, um canal dedicado, ainda não estavam disponíveis. O que implica, nessa situação, que o tráfego analisado poderia ser agregado em rajadas e transmitido com menor ocupação de recursos mesmo nos casos de carga alta.

Nos casos em que a carga é alta, com pequeno tempo de interchegadas associado à altíssima autossimilaridade, o paradigma de comutação mais adequado é OCS pois, além haver poucos intervalos de ociosidade da fibra devido à alta carga; um grau de autossimilaridade elevada implica em instantes com altíssimas chegadas de pacotes, o que pode ser um fator complicador na montagem das rajadas. Nessa situação, a montagem de rajadas poderia exigir uma *bufferização* dos dados, uma vez que o fluxo que chega em um instante de tempo pode ser maior que o número de pacotes suportados por uma ou poucas rajadas, provocando uma atraso na rede que pode ser indesejável, mesmo que a QoS exigida na época fosse pequena comparada à exigida atualmente.

Observa-se ainda na Tabela 5 que, para o primeiro *trace* de ago/89 os primeiros *traces* de jan/90, a saída do Classificador/Selecionador é OPS. Isso explica-se pelo intervalo de interchegadas relativamente alto associado à uma taxa de pacotes pequena, caracterizando um tráfego de alta granularidade e esparso, o que pode inclusive deteriorar a QoS se houver a necessidade de montagem de rajadas, o que implica em um atraso para agrupar os pacotes.

5.2.2 Experimento 2 (Tráfego Internet)

Neste segundo experimento com o Classificador/Selecionador proposto foi utilizado um tráfego Internet de referência disponível em [11] e consistiu na verificação do seu funcionamento, aplicando-se diferentes *traces* de tráfego Internet na sua entrada e observando-se sua saída. Neste estudo foram analisados 56 *traces* com duração de 2h, coletados em 2002 e 2003 de um enlace de alta velocidade, conectando o campus da Universidade da Carolina do Norte ao seu provedor de serviços Internet. A análise do tráfego em um mesmo local por dois anos consecutivos, mostrou que o surgimento de uma única aplicação alterou consideravelmente os parâmetros estatísticos do tráfego. Esse resultado contribui para justificar a escolha da lógica Fuzzy como ferramenta de implementação do Classificador/Selecionador proposto. A Figura 37 ilustra a estimativa dos parâmetros de Hurst de acordo com a contagem de pacotes nos dois anos consecutivos do estudo em questão [11].

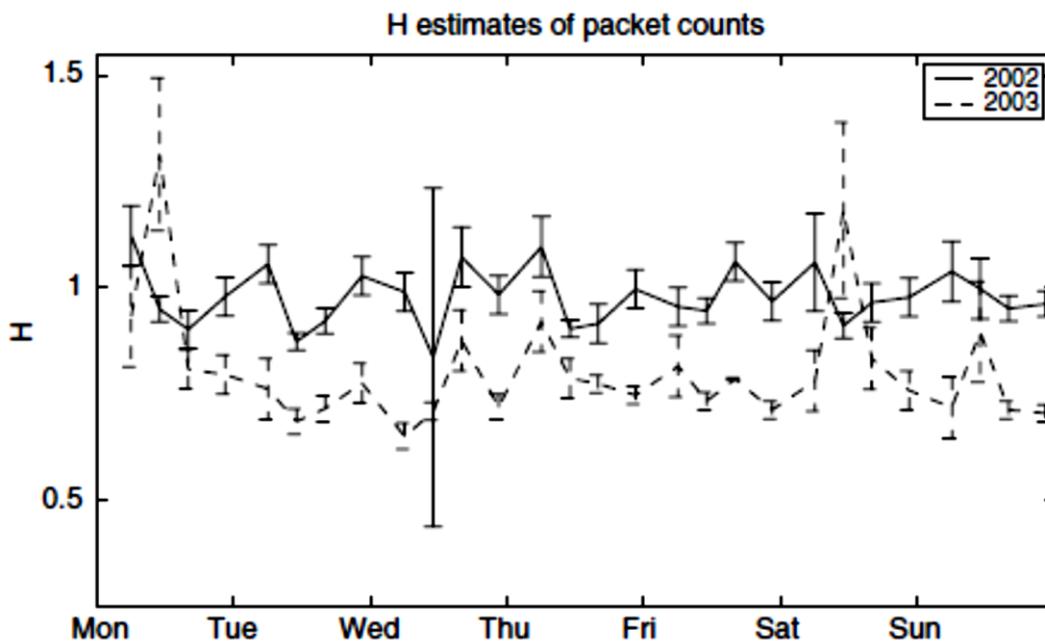


Figura 37 – Estimativa do parâmetro de Hurst em 2002 e 2003 [11].

O estudo de Park [11] mostra, ainda, que variações na carga não produzem alterações significativas no parâmetro de Hurst, que pode ser associado principalmente ao tipo de tráfego e às aplicações que estão sendo utilizadas predominantemente a cada momento, ou seja, é um fator dependente do cliente e, portanto, incontrolável e

de difícil modelagem. A Figura 38 ilustra a estimativa do parâmetro de Hurst de acordo com a utilização dos *links* monitorados.

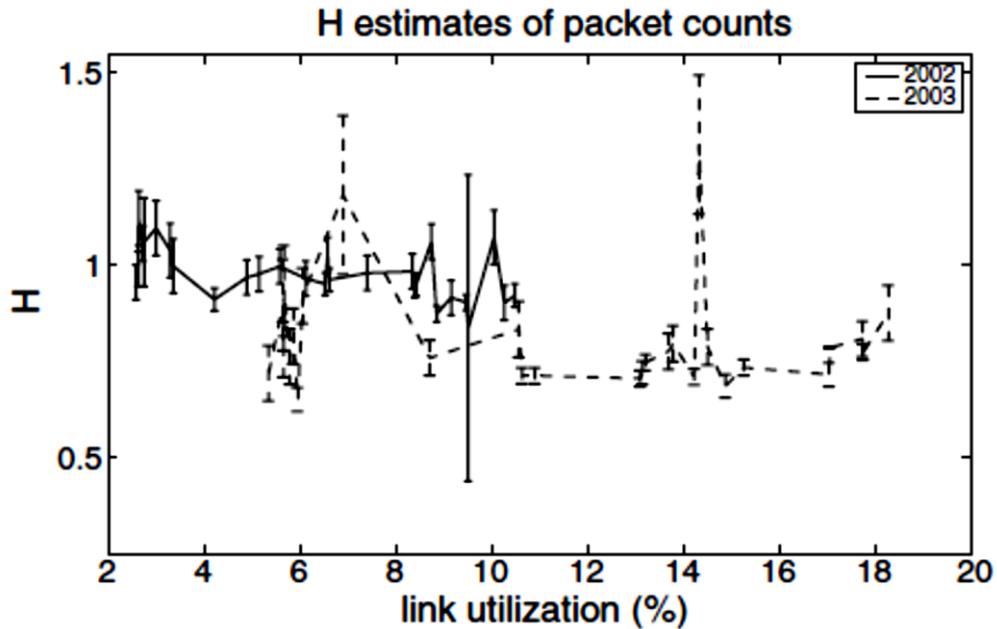


Figura 38 – Estimativa do parâmetro de Hurst em 2002 e 2003 [11].

O funcionamento do Classificador/Seletor foi analisado segundo as suas diferentes modelagens: Modelo 1, incluindo os paradigmas OCS, OBS e OPS e Modelo 2 (versão inserida no TONetS) com apenas os paradigmas OCS e OBS.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados na saída do Classificador/Seletor em termos do paradigma de comutação óptica esperado e obtido para cada *trace* de duas horas do tráfego Internet de referência [11].

Tabela 4 – Características do tráfego Internet (ano de 2002) utilizado para validação do Classificador/Selecionador [11].

	Tráfego	Total de pacotes	λ médio (pcts/s)	Δt médio (s)	Parâmetro de Hurst	Saída Esperada modelo 2	Saída Obtida modelo 2	Saída esperada modelo 1	Saída obtida modelo 1
tráfego baixo 2002	UNC 2002 - domingo 5h	118800000	16500	$6,06 \cdot 10^{-5}$	1,04	OBS	OBS	OPS	OPS/OBS
	UNC 2002 - 2a feira 5h	118500000	16458,33	$6,08 \cdot 10^{-5}$	1,12	OBS	OBS	OPS	OPS/OBS
	UNC 2002 - 3a feira 5h	111900000	15541,67	$6,43 \cdot 10^{-5}$	1,06	OBS	OBS	OPS	OPS/OBS
	UNC 2002 - 4a feira 5h	120900000	16791,67	$5,96 \cdot 10^{-5}$	0,99	OBS	OBS	OBS	OPS/OBS
	UNC 2002 - 5a feira 5h	113200000	15722,22	$6,36 \cdot 10^{-5}$	1,10	OBS	OBS	OPS	OPS/OBS
	UNC 2002 - 6a feira 5h	110200000	15305,56	$6,53 \cdot 10^{-5}$	0,96	OBS	OBS	OBS	OBS
	UNC 2002 - sábado 5h	108100000	15013,89	$6,66 \cdot 10^{-5}$	1,06	OBS	OBS	OBS	OBS
tráfego alto 2002	UNC 2002 - domingo 15h	185600000	25777,78	$3,88 \cdot 10^{-5}$	0,95	OBS	OBS	OBS	OBS
	UNC 2002 - 2a feira 15h	243300000	33791,67	$2,96 \cdot 10^{-5}$	0,90	OBS/OCS	OCS (0.51)	OBS/OCS	OCS
	UNC 2002 - 3a feira 15h	253600000	35222,22	$2,84 \cdot 10^{-5}$	0,92	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2002 - 4a feira 15h	245000000	34027,78	$2,94 \cdot 10^{-5}$	1,07	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2002 - 5a feira 15h	221200000	30722,22	$3,25 \cdot 10^{-5}$	0,92	OBS/OCS	OBS	OBS/OCS	OBS
	UNC 2002 - 6a feira 15h	214700000	29819,44	$3,35 \cdot 10^{-5}$	1,06	OBS	OBS	OBS	OBS
	UNC 2002 - sábado 15h	168800000	23444,44	$4,27 \cdot 10^{-5}$	0,97	OBS	OBS	OBS	OBS

Tabela 5 – Características do tráfego Internet (ano de 2003) utilizado para validação do Classificador/Selecionador [11].

	Tráfego	Total de pacotes	λ médio (pcts/s)	Δt médio (s)	Parâmetro de Hurst	Saída Esperada modelo 2	Saída Obtida modelo 2	Saída esperada modelo 1	Saída obtida modelo 1
tráfego baixo 2003	UNC 2003 - domingo 5h	233000000	32361,11	$3,09 \cdot 10^{-5}$	0,72	OBS	OBS	OBS	OBS
	UNC 2003 - 2a feira 5h	233000000	32361,11	$3,09 \cdot 10^{-5}$	0,93	OBS/OCS	OBS (0.459)	OBS/OCS	OBS
	UNC 2003 - 3a feira 5h	254000000	35277,78	$2,83 \cdot 10^{-5}$	0,76	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2003 - 4a feira 5h	250000000	34722,22	$2,88 \cdot 10^{-5}$	0,65	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2003 - 5a feira 5h	250000000	34722,22	$2,88 \cdot 10^{-5}$	0,92	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2003 - 6a feira 5h	257000000	3569,44	$2,80 \cdot 10^{-5}$	0,82	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2003 - sábado 5h	241000000	33472,22	$2,99 \cdot 10^{-5}$	0,78	OBS/OCS	OCS	OBS/OCS	OCS
tráfego alto 2003	UNC 2003 - domingo 15h	342000000	47500	$2,11 \cdot 10^{-5}$	0,71	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2003 - 2a feira 15h	449000000	62361,11	$1,60 \cdot 10^{-5}$	0,81	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2003 - 3a feira 15h	455000000	63194,44	$1,58 \cdot 10^{-5}$	0,72	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2003 - 4a feira 15h	456000000	63333,33	$1,58 \cdot 10^{-5}$	0,88	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2003 - 5a feira 15h	456000000	63333,33	$1,588 \cdot 10^{-5}$	0,77	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2003 - 6a feira 15h	443000000	61527,78	$1,62 \cdot 10^{-5}$	0,79	OCS	OCS	OCS	OCS
	UNC 2003 - sábado 15h	340000000	47222,22	$2,12 \cdot 10^{-5}$	0,83	OCS	OCS	OCS	OCS

Os resultados apresentados na Tabela 6 mostram que a escolha de paradigmas de comutação óptica feita pelo Classificador/Selecionador está coerente. Nota-se por exemplo que, na maioria dos casos, o paradigma de comutação selecionado foi OBS e OPS. Esse fato pode ser atribuído ao uso de *traces* de tráfego mais recentes para a elaboração das funções de pertinência [23], o que faz com que, tráfegos antigos apresentem taxas de chegadas de bits consideradas baixas e interchegadas altas na aplicação das regras. Uma outra razão associada ao parâmetro de Hurst, é que tráfegos muito autossimilares, implicam em períodos de ociosidade dos enlaces ópticos o que em situações de baixa carga, favorecem o uso das comutações OBS e OPS. No entanto, à medida que a carga sobe, embora os intervalos de ociosidade dos enlaces permaneçam, há instantes em que a chegada de pacotes se torna altíssima, o que durante o processo de montagem de rajadas pode implicar em longas filas e, conseqüentemente, grande latência e degradação da QoS.

Em contrapartida, quando o tráfego apresenta menor dependência de longa duração, sob cargas mais baixas, o tráfego pode ser *bufferizado* para utilização do paradigma OBS, sem que haja grande prejuízo à QoS, mesmo que um tráfego com comportamento menos autossimilar apresente menos intervalos de ociosidade. À medida que a carga aumenta, num cenário em que se tem pouca ociosidade do meio de transmissão, o uso da comutação OCS garante melhor QoS e evita longas filas.

O conflito entre qual fator é mais relevante em cada caso exige uma solução de compromisso que pode ser resolvida adequadamente pela lógica Fuzzy ponderando-se de forma adequada os períodos em que um fator pesa mais que outro por meio das funções de pertinência.

5.2.3 Experimento 3 (Tráfego VoIP)

Neste terceiro experimento foi utilizado um tráfego VoIP (Voz sobre IP) coletado em uma grande operadora de telecomunicações brasileira no dia 4 de maio de 2006 durante 92,4 segundos [63] e consistiu na verificação do funcionamento do Classificador/Selecionador proposto, aplicando-se este *trace* de tráfego na sua entrada e observando-se sua saída. A operadora oferecia um serviço de VoIP para, aproximadamente, 10.000 usuários ativos na época da coleta do tráfego. A Tabela 6

ilustra as características estatísticas do tráfego VoIP de referência para este experimento.

Tabela 6 – Características estatísticas do tráfego VoIP utilizado para validação do Classificador/Selecionador [63].

TAXA DE CHEGADA DE PACOTES (λ)	26.311
TEMPO DE INTERCHEGADAS (ΔT)	$4,187 * 10^{-5} s$
PARÂMETRO DE HURST (H)	0,58

A Figura 39 ilustra uma série temporal representando os intervalos entre os pacotes RTP (*Real Time Protocol*) transportando o tráfego VoIP analisado em [63].

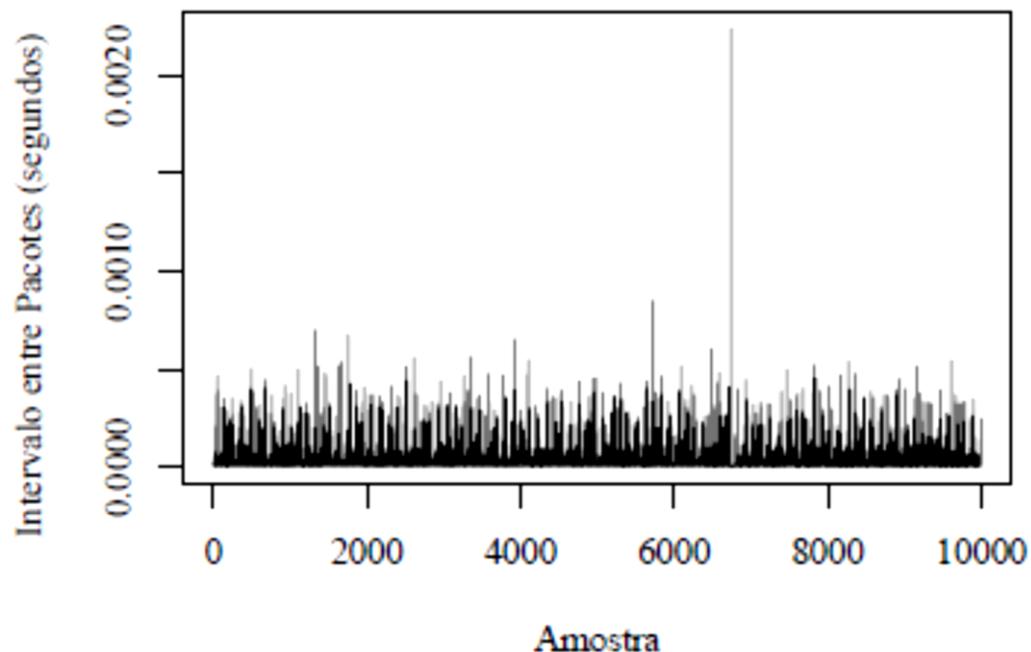


Figura 39 – Série temporal representando os intervalos entre pacotes RTP [63].

Os parâmetros do tráfego VoIP foram aplicados ao Classificador/Selecionador, cuja defuzzificação é ilustrada na Figura 40, da seguinte maneira:

- i. As três entradas (λ , H, Δt) são aplicadas a cada uma das 27 regras (representadas nas 27 linhas) e aplicadas à função de pertinência associada a cada entrada (curvas e amarelo);

- ii. Sob as funções de pertinência são aplicados os operadores Fuzzy $\min(\lambda, H, \Delta t)$, cujo resultado é aplicado nas funções de pertinência de saída (OBS e OCS);
- iii. A superfície resultante da aplicação dos operadores Fuzzy em cada uma das 27 regras é somada – agregação segundo o operador $\max(\text{OBS}, \text{OCS})$ – gerando a superfície azul no canto direito;
- iv. É calculado o centroide da superfície resultante, gerando uma saída numérica.

A aplicação do tráfego VoIP ao Classificador/Selecionador resultou em uma saída de 0,747, indicando que o tráfego deveria ser roteado via circuitos ópticos (OCS). À primeira vista, esse resultado pode parecer inconsistente uma vez que o intervalo de silêncio em conversações de voz é conhecido e razoavelmente bem modelado o que pode sugerir uma comutação por rajadas (OBS) para aproveitar os períodos de ociosidade. No entanto, é importante observar que o intervalo de silêncio é válido para chamadas individuais mas quando se trata de tráfego agrupado, conforme ilustrado pela Figura 45 e pelas características apresentadas na Tabela 7, não resulta em grandes períodos de ociosidade.

O parâmetro de Hurst medido neste *trace* (0,58), indica, ainda, que há baixa dependência de longa duração o que implica em poucas rajadas sobre uma curva suave e constante da taxa de chegada de pacotes quando o tráfego é agrupado. Estes fatos, associados à QoS exigida por serviços em tempo real, tornam o tráfego VoIP adequado à comutação OCS, o que mostra-se coerente, portanto, ao resultado obtido pelo Classificador/Selecionador proposto neste trabalho.

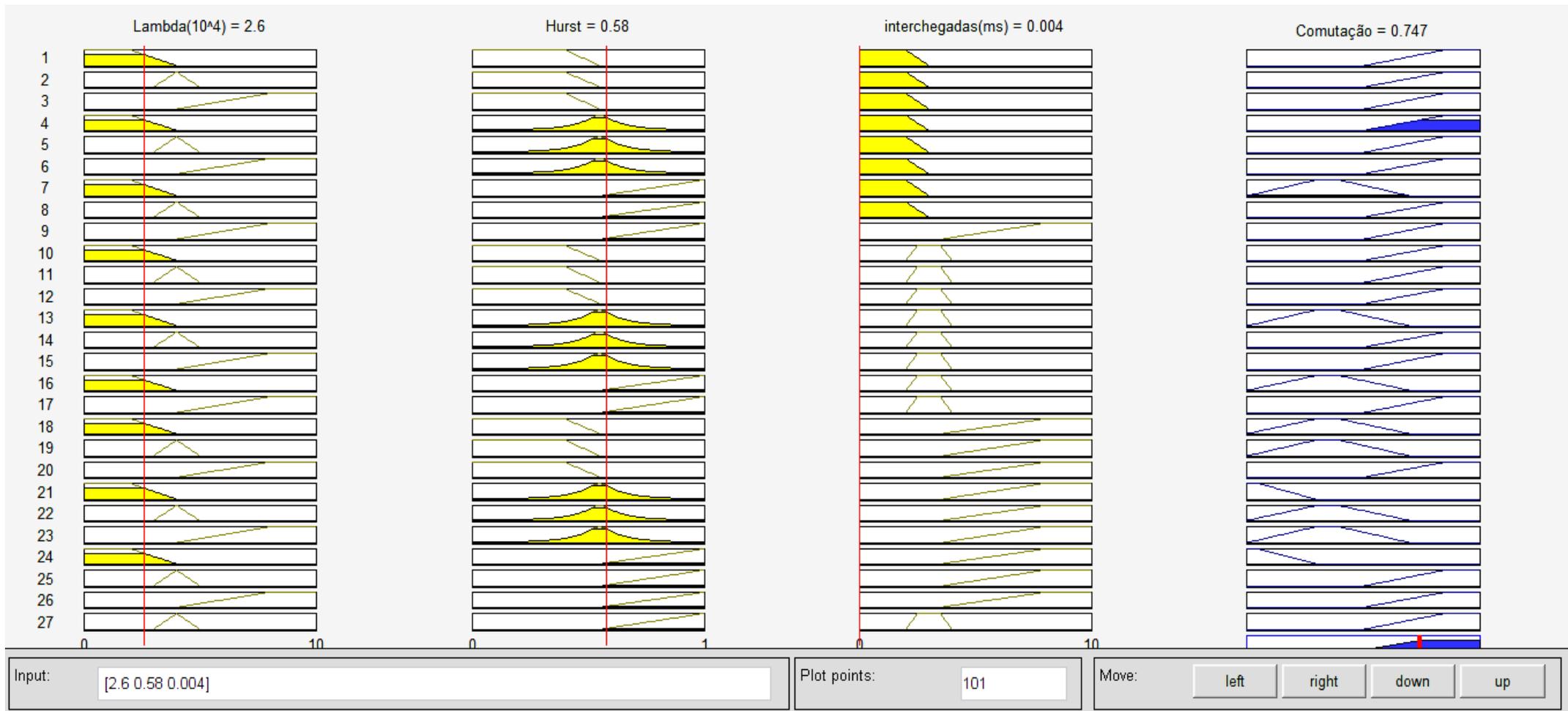


Figura 40 – Resultado do processo de inferência e *defuzzificação* no Classificador/Selecionador sob tráfego VoIP.

5.3 Avaliação de desempenho de rede óptica híbrida OCS/OBS

O Classificador/Selecionador, foi acoplado ao simulador TONetS a fim de viabilizar um estudo de desempenho de rede óptica híbrida OCS/OBS. O principal ganho esperado ao se utilizar redes ópticas híbridas é a economia e a otimização dos recursos durante o transporte de tráfego esparso. A fim de se avaliar tais ganhos, define-se a métrica Economia Relativa de Recursos como:

$$E_U(\%) = \frac{U_{OCS} - U_{OBS}}{U_{OCS}} \times 100 \quad (2.14)$$

sendo U_{OCS} e U_{OBS} a utilização da rede empregando a comutação OCS e a OBS, respectivamente.

Foi realizado um estudo de desempenho, considerando uma rede de topologia simples (Fig. 41) submetida aos paradigmas de comutação OBS e OCS, separadamente e juntos em uma rede óptica híbrida paralela OCS/OBS usando o Classificador/Selecionador proposto neste trabalho. No caso da rede híbrida OCS/OBS, variou-se uniformemente o valor do parâmetro de Hurst entre 0,3 e 1,0 a fim de garantir o dinamismo na rede.

Nos três cenários analisados, utilizou-se 40 canais ópticos (i.e., comprimentos de onda) por enlace submetidos a uma carga inicial de 10 Erlangs e 140 Erlangs a fim de comparar o desempenho em termos de Utilização de Recursos.

Em cada experimento de simulação foram consideradas 1000 requisições, duas replicações e nível de confiança de 0,95. O algoritmo utilizado para o RWA foi o *First Fit* e todas as simulações foram realizadas considerando uma arquitetura de rede óptica sem nós com capacidade de conversão de comprimento de onda.

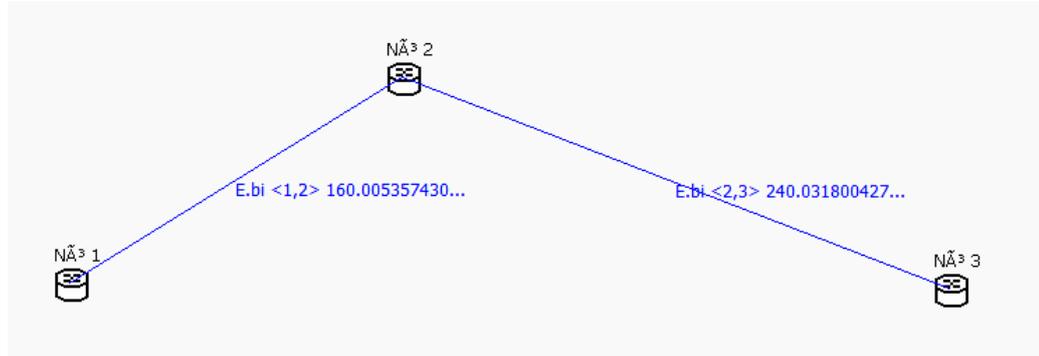


Figura 41 – Topologia simples analisada.

5.3.1 Cenário com carga inicial de 10 Erlangs

O primeiro experimento considerou uma rede OCS com a topologia ilustrada na Figura 46 submetida a uma carga inicial de 10 Erlangs com cinco incrementos de 10 Erlangs. As Figuras 42 e 43 ilustram os resultados da simulação em termos da utilização geral da rede e da utilização por comprimento de onda, respectivamente, deste cenário com rede OCS.

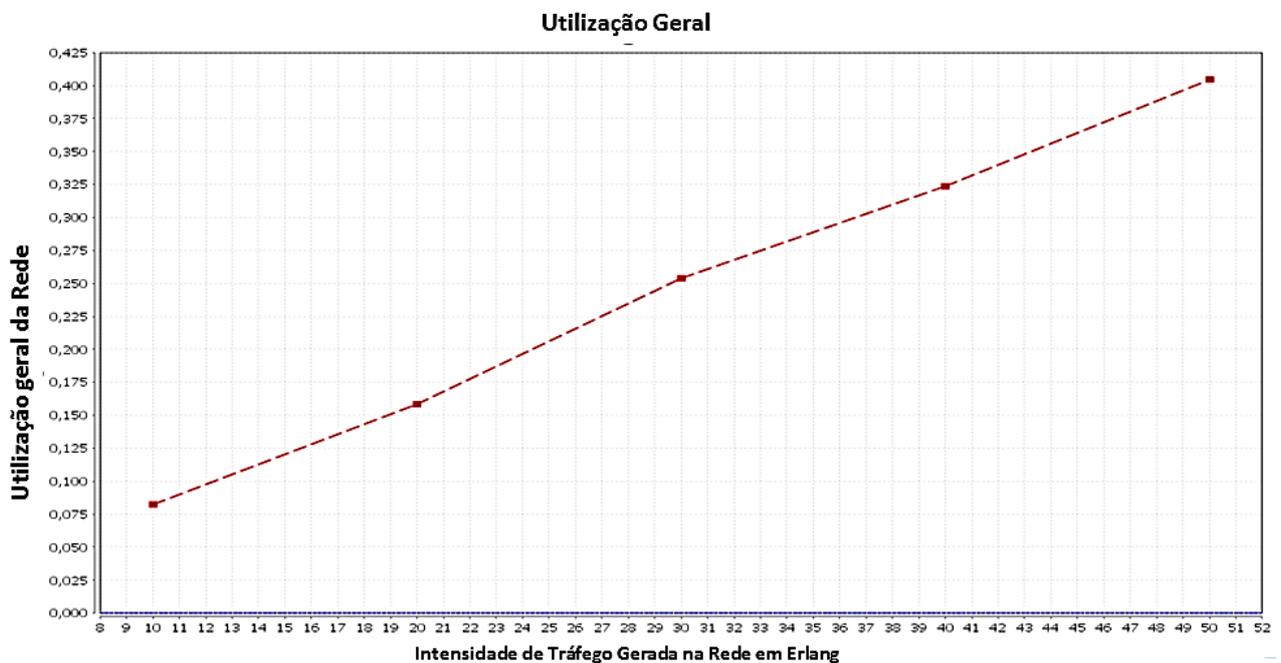


Figura 42 – Utilização da rede OCS sob carga inicial de 10 Erlangs.

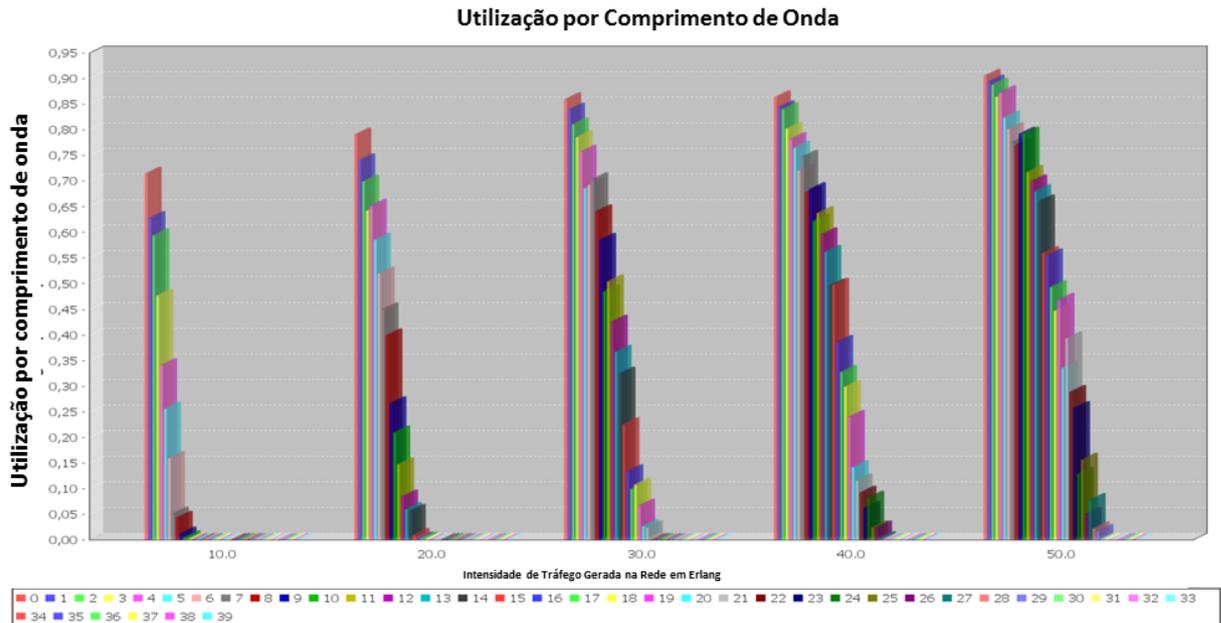


Figura 43 – Utilização da rede por Comprimento de Onda da rede OCS sob carga inicial de 10 Erlangs.

As Figuras 42 e 43 mostram que, devido à baixa carga na rede, há sobra de recursos, implicando em Probabilidade de Bloqueio desprezível.

Também neste cenário de carga baixa, foram feitas simulações com rede OBS e rede híbrida OCS/OBS com resultados bastante semelhantes. Em particular, a rede OBS apresentou um desempenho um pouco inferior, com Probabilidade de Bloqueio de 0,15% sob 50 Erlangs e nula para os outros valores de carga.

5.3.2 Cenário com carga inicial de 140 Erlangs

Neste experimento, inicialmente, uma rede OCS com a topologia ilustrada na Figura 41 foi submetida a uma carga inicial de 140 Erlangs com cinco incrementos de 10 Erlangs. As Figuras 44 e 45 ilustram os resultados das simulações em termos das métricas utilização geral da rede e utilização por comprimento de onda, respectivamente para uma rede OCS.

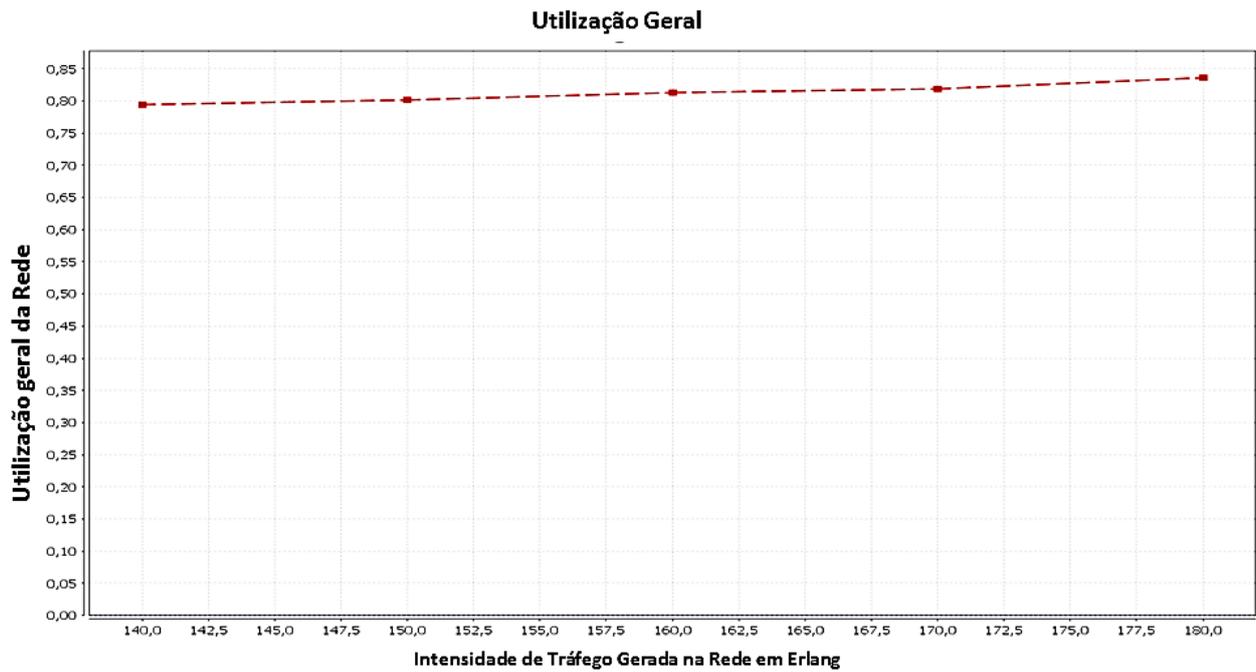


Figura 44 – Utilização da Geral da Rede OCS sob carga inicial de 140 Erlangs.

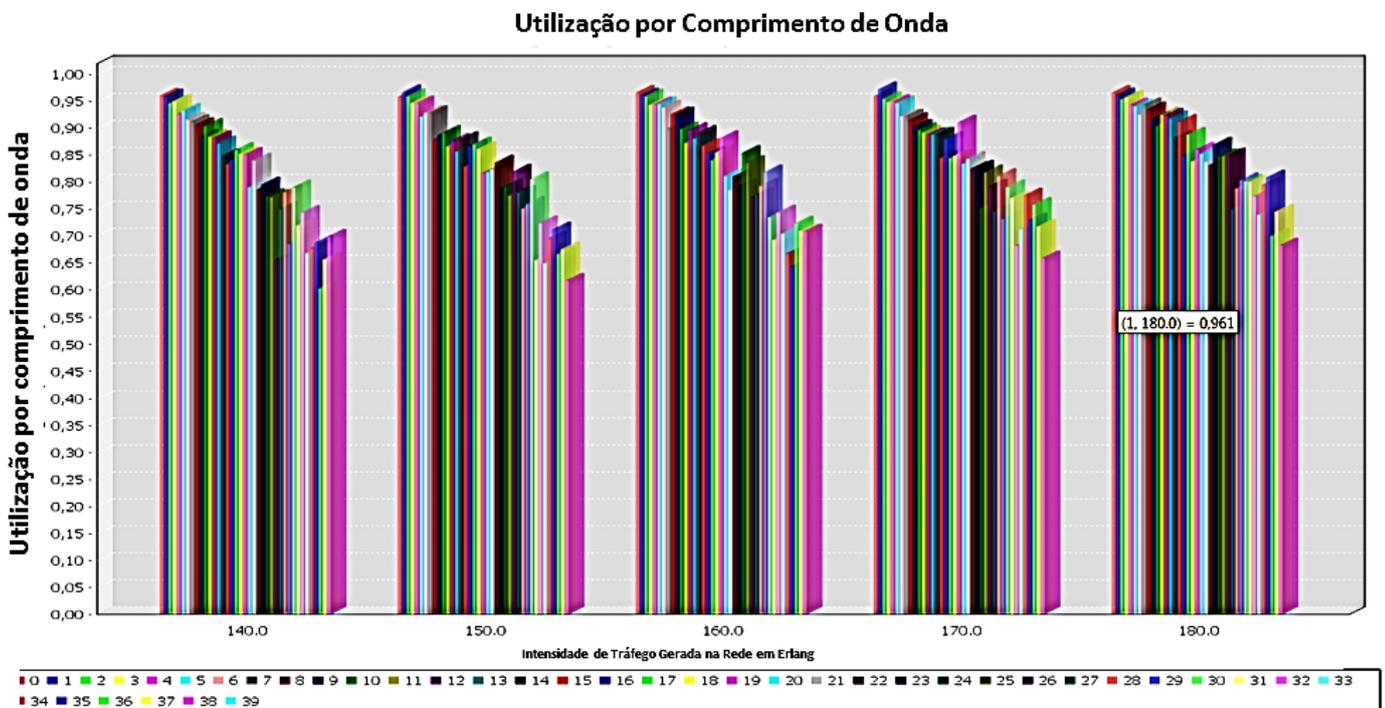


Figura 45 – Utilização da rede por Comprimento de Onda da rede OCS sob carga inicial de 140 Erlangs.

A utilização da rede observada neste cenário com rede OCS foi bastante alta – 83,6% de sua capacidade com 180 Erlangs.

O mesmo cenário de carga inicial foi aplicado a uma rede OBS com a mesma topologia resultando num desempenho mostrado nas Figuras 46 e 47.

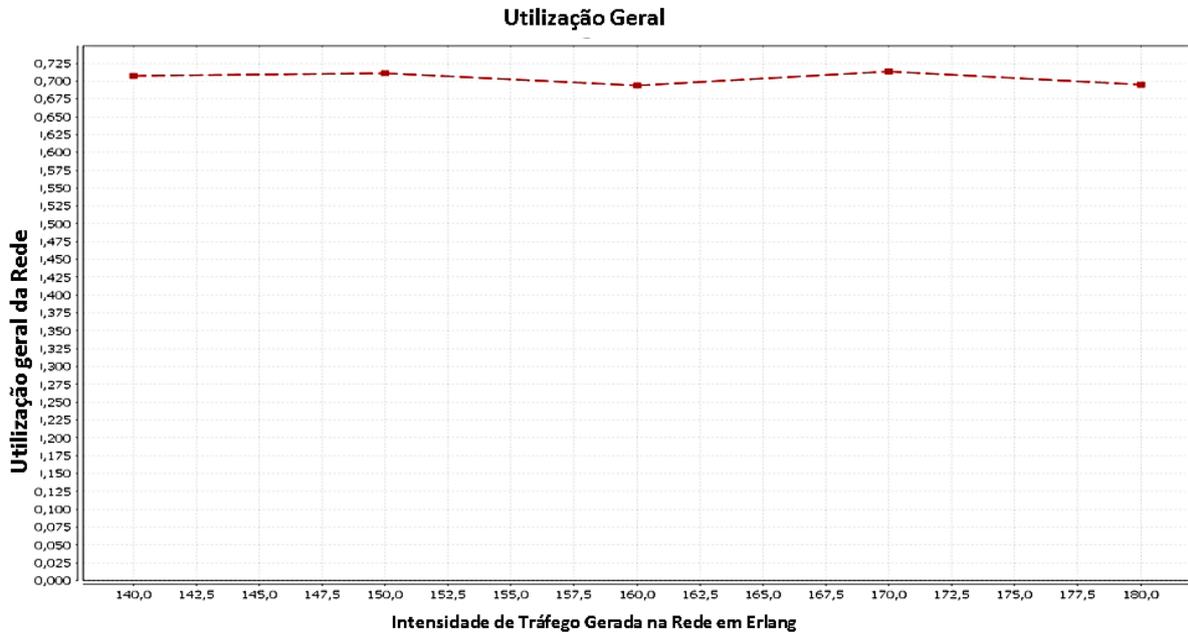


Figura 46 – Utilização Geral da Rede OBS sob carga inicial de 140 Erlangs.

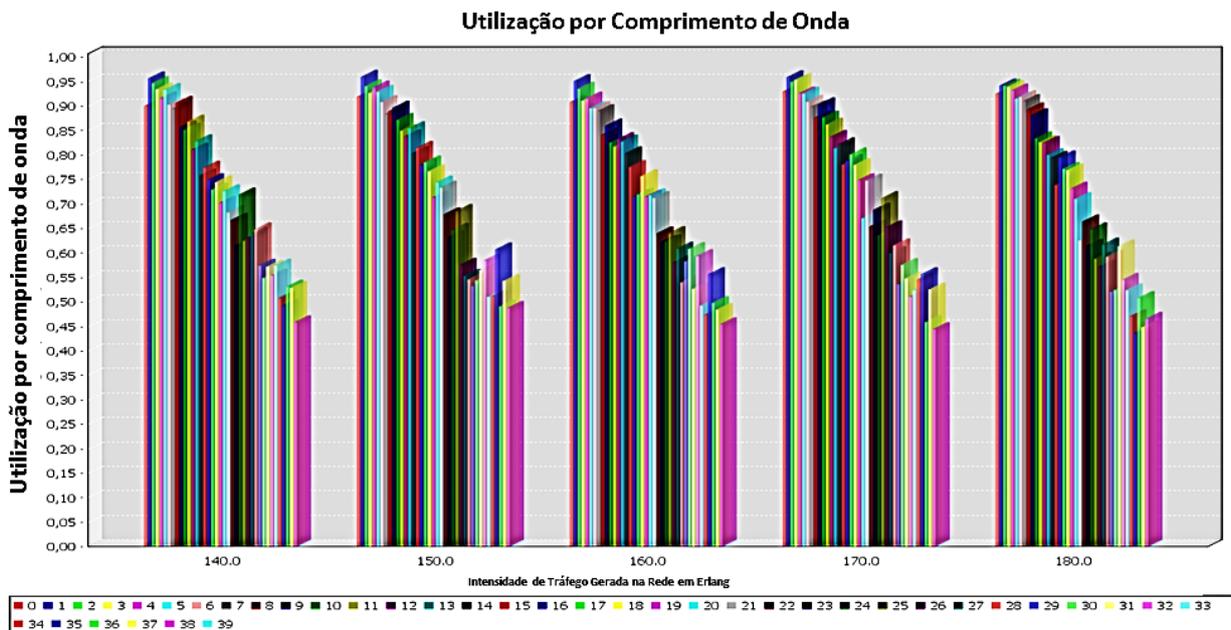


Figura 47 – Utilização por Comprimento de Onda OBS sob carga inicial de 140 Erlangs.

Uma análise comparativa dos resultados das Figuras 44 a 47 mostra que a comutação OBS melhora o desempenho da rede em termos de utilização dos recursos,

embora tipicamente o OBS apresenta probabilidades de bloqueio maiores que o OCS [4, 8, 68]. Tal resultado é coerente e pode ser associado ao fato de que na comutação OBS ocorre a liberação dos enlaces intermediários antes do término da conexão, de modo que os recursos ficam disponíveis para novas requisições. Quando a carga da rede é alta, a liberação dos enlaces intermediários propiciada pela comutação OBS passa a ser relevante para o desempenho da rede. A Tabela 8 ilustra a economia de recursos obtida pelo paradigma OBS, segundo a Equação 2.14.

Tabela 7 – Economia Relativa de Recursos.

Utilização da Rede			
Carga (E)	OCS	OBS	$E_U(\%)$
140	0,802	0,694	13,47
150	0,801	0,715	10,74
160	0,822	0,715	13,02
170	0,822	0,710	13,62
180	0,83	0,726	12,53

Conforme esperado, a comutação OBS apresentou melhor desempenho em termos de economia de recursos. Para todas as situações de carga, se obteve uma economia superior a 10% em relação à comutação OCS; esse é um fator importante principalmente quando se consideram redes grandes cujo aumento da disponibilidade de recursos implica em grandes investimentos.

O mesmo cenário de carga (140 Erlangs inicial) foi utilizado com a rede híbrida OCS/OBS, com o valor do parâmetro de Hurst variando uniformemente entre 0,3 e 1,0. Os resultados de desempenho obtidos estão mostrados nas Figuras 48 e 49.

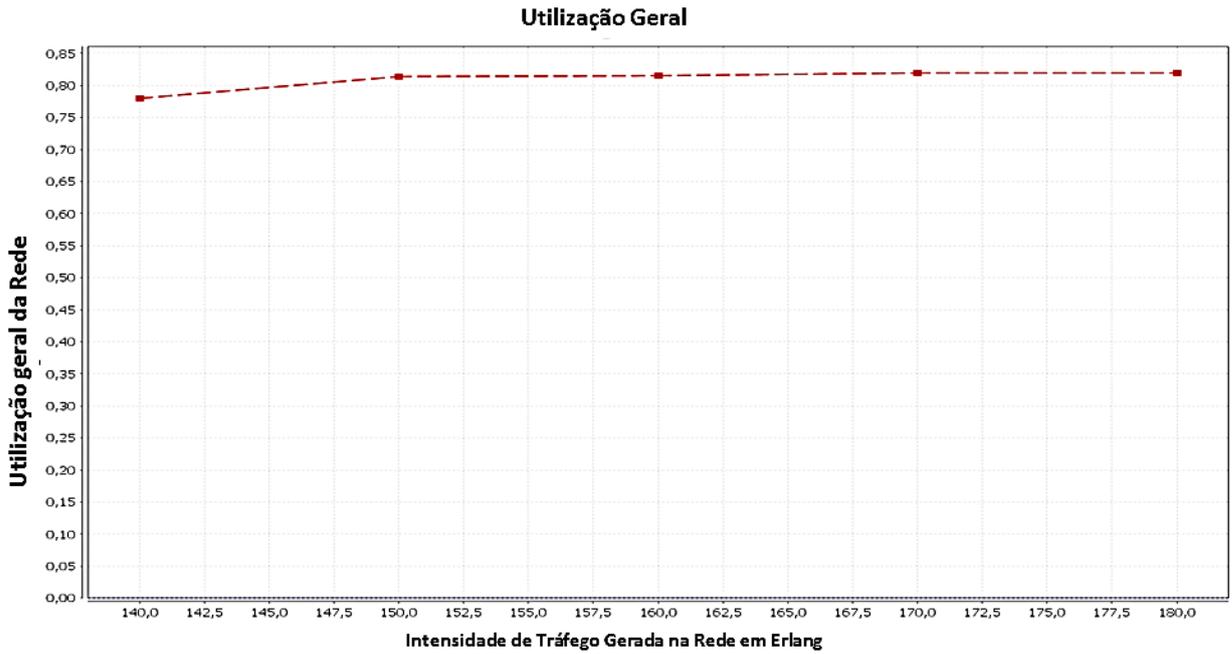


Figura 48 – Utilização Geral com Comutação Híbrida OCS/OBS sob carga inicial de 140 Erlangs.

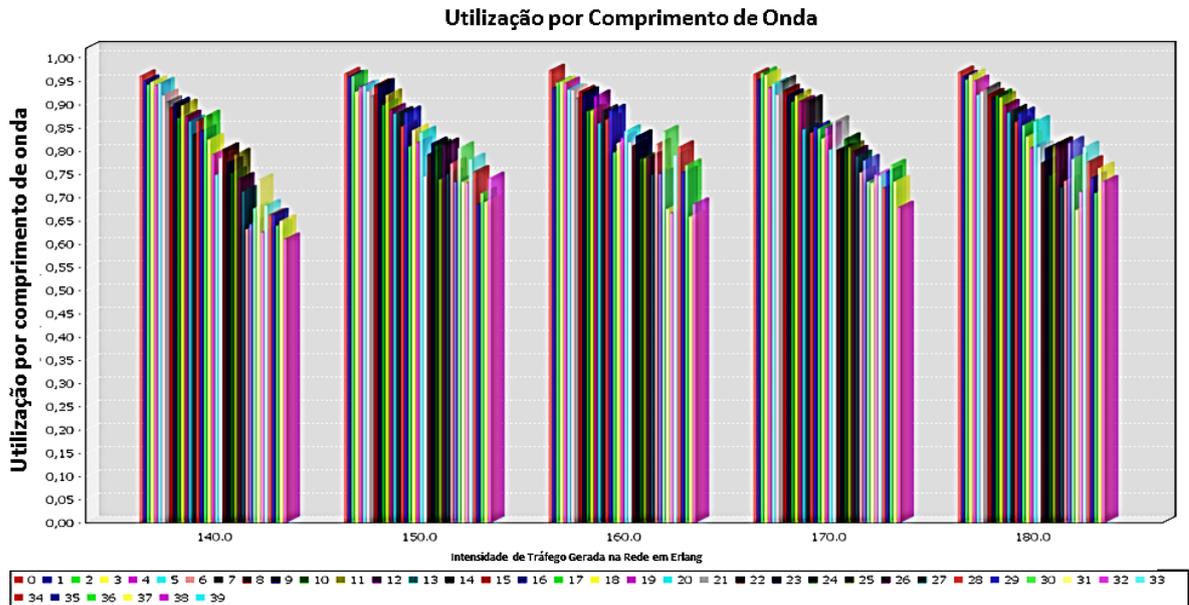


Figura 49 – Utilização por Comprimento de Onda com Comutação Híbrida OCS/OBS sob carga inicial de 140 Erlangs.



Figura 50 – Probabilidade de Bloqueio com Comutação Híbrida OCS/OBS sob carga inicial de 140 Erlangs.

A comutação híbrida OCS/OBS, como esperado, apresentou um resultado de desempenho intermediário com relação aos obtidos com os paradigmas OBS e OCS isoladamente. A utilização da rede foi ligeiramente menor quando comparada ao resultado obtido pelo OCS isoladamente e a probabilidade de bloqueio fica elevada (varia de 15% a 20%) mas intermediária à obtida com os paradigmas de comutação isoladamente, o que é esperado. Deve-se ressaltar, no entanto, que esses valores de probabilidade de bloqueio são muito altos para uma rede real e consequência do tráfego intenso utilizado neste trabalho para evidenciar as diferenças de desempenho das redes OBS e OCS, principalmente em função da utilização da rede. Em todos os casos, as diferenças no desempenho ficam mais visíveis de acordo com o paradigma que é escolhido em predominância, ou seja, de acordo com o tráfego de entrada.

No caso de tráfego mais esparsos, uma maior parcela do tráfego é comutada por rajadas, tornando o desempenho geral da rede mais próximo aos obtidos com o paradigma OBS isoladamente. Para tráfegos mais contínuos, ocorre o inverso.

Análises recentes [23, 24, 25, 26, 61, 62] indicam que o tráfego dos *backbones* é composto principalmente por pacotes de dados, o que implica que uma parcela significativa do tráfego pode ser comutada via rajadas, otimizando a infraestrutura já instalada e evitando o desperdício de recursos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho é proposto um mecanismo de classificação de tráfego e seleção de paradigmas de comutação óptica (i.e., Classificador/Selecionador), transparente a protocolos, flexível e escalável, para uso em comutadores de borda de redes ópticas híbridas. O Classificador/Selecionador, implementado com lógica Fuzzy, analisa parâmetros estatísticos do tráfego de entrada na rede óptica híbrida tais como a taxa de chegada de pacotes (λ), o tempo de interchegadas (Δt) e o parâmetro de Hurst (H), e os aplica à uma matriz de regras Fuzzy configurável, obtendo como saída o paradigma de comutação óptica mais adequado ao transporte do tráfego analisado.

O diferencial do uso da lógica Fuzzy na implementação do Classificador/Selecionador está na facilidade desta ferramenta para o tratamento de problemas não lineares, dispensando modelos matemáticos complexos, o que simplifica a análise de parâmetros estatísticos que não estão, necessariamente, correlacionados. Outras vantagens da lógica Fuzzy são a sua robustez e a facilidade para realizar alterações no sistema.

A robustez característica da lógica Fuzzy faz com que a saída do Classificador/Selecionador não seja prejudicada por entradas imprecisas. Tal característica é fundamental para a análise de tráfego *on-line*, uma vez que é desejável que a estimativa dos parâmetros do tráfego seja feita sem a exigência de grandes *buffers*, evitando a criação de atrasos ao tráfego.

A flexibilidade de alteração das regras de classificação e seleção é outra característica essencial do Classificador/Selecionador propiciada pelo uso da lógica Fuzzy na sua implementação, uma vez que o tráfego está em constante mudança com o surgimento de novas aplicações e protocolos. Por exemplo tem sido observado nos últimos anos que o surgimento e popularização de uma única aplicação é capaz de alterar sensivelmente as propriedades do tráfego na Internet.

A possibilidade de análise do funcionamento do Classificador/Selecionador submetido a tráfegos de referência obtidos na literatura permite uma calibração flexível das suas regras de decisão. Embora a lógica Fuzzy utilize um método de classificação de tráfego mais complexo do que o uso de limiares fixos de continuidade e descontinuidade do tráfego, ela permite uma ponderação das propriedades do tráfego em conjunto, favorecendo uma classificação de forma mais coerente.

O presente trabalho propôs um mecanismo de classificação de tráfego e seleção de paradigma de comutação para redes ópticas híbridas baseado no uso de lógica Fuzzy, uma ferramenta até então pouco explorada neste segmento da engenharia. Esta novidade traz consigo novos desafios a serem investigados em trabalhos futuros como, por exemplo:

- avaliação da redução da latência nos serviços com elevada qualidade de serviço (QoS) com o uso de redes ópticas híbridas e a consequente redução na disputa de recursos entre serviços de QoS mais baixa com os serviços de QoS mais exigente;
- uso da lógica Fuzzy em outras formas de gerenciar o tráfego.

REFERÊNCIAS

- [1] KANEDA, S.; UYEMATSU, T.; NAGATSU, N.; SATO K. “Network design and cost optimization for label switched multilayer photonic IP networks.” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, New York, v. 23, n. 8, p. 1612-1619, Aug. 2005.
- [2] MUKHERJEE, B. Optical Communications Networks. McGraw-Hill, 2006.
- [3] O’MAHONY, M. J., KONIDIS, D., SIMEONIDOU, K., “Future optical Networks”, Journal of Lightwave Technology, vol. 24, n. 12, Dec. 2006.
- [4] REZA, MD. S., HOUSSAIN, MD., M., MAJUMDER, S. P., “Contention problem in optical burst switching network”, International Conference on Computational Intelligence Communication Networks - IEEE, Bhopal, India, Nov. 2010.
- [5] GAUGER, C. M. et al., “Hybrid Optical Network Architectures: Bringing Packets and Circuits Together”, IEEE Communications Magazine, pp.36 – 42, Aug. 2006.
- [6] FUKUDA, T., BABA, K., SIMOJO, S., “A study on Hybrid Optical Network Architecture with OCDM technology”, International Conference on Communications, IEEE – ICC, Ottawa, Canada, Jun. 2012.
- [7] FIORANI, M., CASONI, M., ALEKSIC, S., “Hybrid Optical Switching for Energy Efficiency and QoS Differentiation in Core Networks”, Journal of Optical Communications Networks, vol. 5, n. 5, May 2013.
- [8] TAFANI, D., MCARDLE, C., BARRY, L. P., “Analytical Model of Optical Burst Switched Networks with Share-per-Node Buffers” IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Kerkyra, Greece, Jul. 2011.

- [9] CORAZZA, G., CERRONI, W., LELI, G., RAFFAELLI, C., SAVI, M., STOL, N., "Analytical Model of 3-level QoS Scheduling in Hybrid Optical Networks", International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) Workshop on Computing, Networking and Communications – IEEE, San Diego, USA, Jan. 2013.
- [10] LEELAND, W. E., TAQQU, M. S., WILLINGER, W., WILSON, D. V., "On the self-similar nature of Ethernet Traffic", IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), vol. 2 Issue 1, pp. 1-15, Feb. 1994.
- [11] PARK, C., HERNANDEZ-CAMPOS, F., MARRON, J. S., SMITH, F. D., "Long-range dependence in a changing Internet traffic mix", Computer Networks, vol. 48, pp. 401-422, Jan. 2005.
- [12] LIEBEHERR, J., BURCHARD, A., CIUCU, F., "Delay Bounds in Communication Networks With Heavy-Tailed and Self-Similar Traffic", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 2, pp. 1010-1024, Feb. 2012.
- [13] KUMAR, L. P. R., KUMAR, S. K., REDDY, D. M., PERATI, M. R., "Analytical model for performance study of the switch under self-similar variable length packet traffic", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, vol. 1, Oct. 2010.
- [14] MANDELBROT, B. B., "The fractal Geometry of Nature.", New York: WH Freeman, 1997.
- [15] KARAGIANNIS, T., MOLLE, M., FALOUTSOS, M., "Long-range dependence – Ten years of Internet traffic modelling", IEEE Internet Computing, Vol.5/8, Sep. 2004.
- [16] PAXSON, V., FLOYD, S., "Wide Area Traffic: the failure of Poisson Modeling", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 33, pp. 226-244, 1995.

- [17] BERAN, J., SHERMAN, R., Taqqu, M., Willinger, W., “Long range dependence in Variable Bit Rate Video traffic”, IEEE Transactions on Communications, Vol. 43, pp. 1566-1579, 1995.
- [18] FOWLER, H., LEELAND, W., “Local Area Network traffic characteristics, with implications for broadband network congestion management”, IEEE JSAC 9, pp. 1139-1149, Sep. 1991.
- [19] ERRAMILI, A., NEIDHARDT, A., SANIEE, I., “Performance Impacts of Multi-Scaling in Wide Area TCP/IP Traffic”, IEEE INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, vol. 1, pp. 352-359, Tel Aviv, Israel, Mar. 2000.
- [20] JUE, J. P; VOKKARANE, V. M. Optical Burst Switched Networks. Springer, 2005.
- [21] BUYASSE, J. et al., “Cost- Effective Burst- Over – Circuit – Switching in a hybrid optical network”, Fifth International Conference on Networking and Services - ICNS '09, pp. 499-504, Valencia, Spain, Apr. 2009.
- [22] GUO, Z., YANG, Y., “High-speed multicast scheduling in hybrid optical packet switches with guaranteed latency”, IEEE transactions on computers, vol. 62, no. 10, Oct. 2013.
- [23] http://www.caida.org/data/passive/passive_trace_statistics.xml. Acesso em 20 de março de 2014.
- [24] WON, Y., FONTUGNE, R., CHO, K., ESAKI, H., FUKUDA, K., “Nine years of observing traffic anomalies: trending analysis in backbone networks”, International Symposium on Integrated Network Management (IM 2013), Gent, Belgium, May 2013.
- [25] <http://www.fukuda-lab.org/mawilab/>. Acesso em 20 de março de 2014.

- [26] FRALEIGH, C., MOON, S., LYLES, B, COTTON, C., KHAN, M., MOLL, D., ROCKELL, R., SEELY, T., DIOT, C., “Packet-level traffic measurements from a Tier-1 IP backbone”, Sprint ATL Technical Report, Nov. 2001.
- [27] GE, A., CALLEGATI, F., TAMIL, L., S., “On Optical Burst Switching and Self-similar Traffic”, IEEE Communications Letters, vol. 4, no.3, Mar. 2000.
- [28] WEI, J. Y.; MCFARLAND, R. I. Just-In-Time Signaling for WDM Optical Burst Switching Networks. Journal of Lightwave Technology, vol. 18, n. 12, Dec. 2000.
- [29] MOURA, I., MAZZULO, F., MARANHÃO, J., SOARES, A., “Impacto da comutação OBS na probabilidade de bloqueio OCS em redes híbridas OCS/OBS”, XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – SBRC, Ouro Preto, Brasil, Apr. 2012.
- [30] VIEIRA, F. H., “Contribuições ao cálculo de banda e de probabilidade de perda para tráfego multifractal de redes”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- [31] ZANG, Z., RIBEIRO, V., J., MOON, S., DIOT, C., “Small-Time Scaling Behaviors of Internet Backbone Traffic: An Empirical Study”, Proceedings of IEEE Infocom, pp. 1826-1836, 2003.
- [32] BERAN, J., “Statistics for Long-Memory Processes”. Chapman & Hall, 1994.
- [33] FALCONER, K., “Fractal geometry Mathematical Foundations and Applications”. England: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [34] FELDMAN, A., GILBERT, A., C., WILLINGER, W., “Data Networks as cascades: investigating the multifractal nature of internet WAN traffic”, Computer Communication Review, vol. 28, pp.42-55, 1998.

- [35] HURST, H. E., “Long-term storage capacity of reservoirs”, Trans. AM. Soc. Civil Engineers, vol. 116, pp. 770-799, 1951.
- [36] BROCKWELL, P. J., DAVIS, R. A., “Introduction to Time Series and Forecasting”. New York: Springer-Verlag, 1996.
- [37] MORETTIN, P. A., TOLOI, C. M. C., “Análise de Séries Temporais”, São Paulo, SP: Edgard Blücher, Ltda., 2004.
- [38] PERCIVAL, D. B., WALDEN, A. T., “Spectral Analysis for Physical Applications”. New York: Cambridge, 1993.
- [39] STARK, H., WOODS, J. W., “Process and Random Processes with Application to Signal Processing”. 3rd. ed. Uper Saddle River, NY: Prentice Hall, 2002.
- [40] PAPOULIS, A. “Probability Random Variables and Stochastic Processes”, Third [S.L.]: McGraw-Hill, 1996.
- [41] Black, B. A., DiPiazza, P. S., Ferguson, B. A., Voltmer, D. R., Berry, F. C., “Introduction to wireless systems”. Prentice Hall, 2008.
- [42] BARRETO, P., “Uma metodologia de engenharia de tráfego baseada na abordagem autossimilar para a caracterização de parâmetros e a otimização de redes multimídia”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2007.
- [43] Tráfego Digital Equipment Corporation, 1995, disponível em: <http://www.acm.org/sigcomm/ITA>. Acesso em 27 de junho de 2014.
- [44] KLIMKE, A., Mandelbrot Set GUI (for Matlab). 2003. Disponível em: <http://matlabdb.mathematik.uni-suttgart.de/index.jsp>.
- [45] LIMA, A. B., “Contribuições à modelagem de teletráfego fractal”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

- [46] SAHINOGLU, Z., TEKINAY, S., "On Multimedia Networks: Self-similar traffic and network performance", IEEE Communications Magazine, vol. 1, pp. 48-52, 1999.
- [47] CROVELLA, M. E., BESTAVROS, A., "Self-similarity in Word Wide Web: evidence and possible causes", IEEE Transactions on Networking, vol. 5, no. 6, pp. 835-846, 1997.
- [48] AMIN, F., MIZANAIN, K., MIRJALILY, G., "Active Queue Management for Self-Similar Network Traffic", 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1-5, Mashhad, Iran, May. 2013.
- [49] GONG, W. B., "Self-similarity and long range dependence on the internet: a second look at the evidence, origins and implications", Computer Networks, vol. 48, pp. 377-399, 2005.
- [50] JORGE, C., VIEIRA, F. H., LING, L., "Predição adaptativa do Expoente de Hölder para tráfego multifractal de redes", XXVIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 2005.
- [51] STÊNCIO, J. W. G., LING, L., "Modelagem Estatística e Análise de Desempenho de Tráfego Multifractal", XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT, Brasília, Brasil, Sep. 2012.
- [52] FALCONER, K., "Fractal geometry: mathematical foundations and applications", 1^a edição, Ed. John Wiley & Sons, 1990.
- [53] RIEDI, R. H., VÉHEL, J. L., "Multifractal properties of TCP traffic: a numerical study.", Technical Report 3129, IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997.
- [54] RIEDI, R. H., LEVY-VEHEL, J., "TCP traffic is multifractal: a numerical study", Preprint, IEEE Transactions of Networking, Oct. 1997.

- [55] BARANIUK, R. G., CROUSE, M. S., RIBEIRO, V. J., RIEDI, R. H., “Network traffic modeling using a multifractal wavelet model”, International Symposium on Digital Signal Processing for Communications System, DSPCS’99, 1999.
- [56] BARANIUK, R. G., CROUSE, M. S., RIBEIRO, V. J., RIEDI, R. H., “A multifractal wavelet model with application to network traffic”, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45, no. 3, pp. 992-1017, Perth, Australia, 1999.
- [57] COX, E., The fuzzy systems handbook: a practitioner’s guide to building, using, and maintaining fuzzy systems . New York: AP Professional, 1994.
- [58] KLEIN, P. A. T., WEBER, L., “Aplicação da lógica fuzzy em software e hardware”, ULBRA, 2008.
- [59] JANÉ D. A., “Uma introdução ao estado da lógica fuzzy”, Revista de Humanidades e Ciências Sociais aplicadas, Ourinhos – SP, 2004.
- [60] MOUNTRUIDOU, X., PERROS, H., “On the Departure Process of Burst Aggregation Algorithms in Optical Burst Switching”, Computer Networks, Jan. 2009.
- [61] <http://ita.ee.lbl.gov/html/traces.html>. Acesso em 20 de março de 2014.
- [62] <http://www.cs.columbia.edu/~hgs/internet/traces.html>. Acesso em 20 de março de 2014.
- [63] PEDROSO, C. M., CALDEIRA, J. P., FONSECA, K., “Caracterização de tráfego VoIP”, XVI Seminário de Iniciação Científica e X Mostra de Pesquisa, Curitiba, Brasil, Nov. 2008.
- [64] SOARES, A., DURÃES, G., GIOZZA, W., CUNHA, P., “TONetS: ferramenta de avaliação de desempenho de redes ópticas transparentes”, 27º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – SBRC, Rio de Janeiro, Brasil, May. 2008.

- [65] TENG, J. AND ROUSKAS, G. N., "A comparison of the JIT, JET, and horizon wavelength reservation schemes on a single OBS node", Proceedings of the First International Workshop on Optical Burst Switching, Dallas, USA, Oct. 2003.
- [66] XIN, C., QIAO, C., YE, Y., DIXIT, S., "A Hybrid Optical Switching Approach", IEEE GLOBECOM, pp. 3808-3812, San Francisco, USA, Dec. 2003.
- [67] LEE, G. M., "Optical Hybrid Switching with flow classification in IP over optical network", Tese de Doutorado, School of Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2007.
- [68] GUO, Z., YANG, Y., "High-speed multicast scheduling in hybrid optical packet switches with guaranteed latency", IEEE transactions on computers, vol. 62, no. 10, Oct. 2013.
- [69] KUMAR, L. P. R., KUMAR, S. K., REDDY, D. M., PERATI, M. R., "Analytical model for performance study of the switch under self-similar variable length packet traffic", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, vol. 1, San Francisco, USA, Oct. 2010.
- [70] RAMASWANI, R., SIVARAJAN, K. N., "Optical networks: a practical perspective", Academic Press, 2002.
- [71] DUTTA, M. K., CHAUBEY, V. K., "Modeling and Characterization of Modified Optical Burst Switching (OBS) Ring Network Using Proxy Node", International Journal on Advance Engineering Information Technology, vol. 2, n. 1, 2012.
- [72] CHAMOLA, V., DUTTA, M. K., CHAUBEY, V. K., "Performance Analysis of Optical Burst Switching (OBS) Network using Fiber Delay Line: A Simulation Approach", International Conference on Communication, Information & Computing Technology, Mumbai, India, Oct. 2012.

- [73] AGRAWAL, G. P. Fiber Optical Communications Systems. Wiley-Interscience, 2002.
- [74] QIAO, C., YOO, M. Optical Burst Switching (OBS) - A New Paradigm for an Optical Internet, J. High Speed Networks, vol. 8, no.1, 1999.
- [75] HUANG, A., XIE, L., LI, Z., XU, A., "Time-Space Label Switching Protocol (TSL-SP) - A New Paradigm of Network Resource Assignment," Photonic Network Communications, vol. 6, no. 2, pp. 169-178, Sept. 2003.
- [76] LEE, G. M. et al., "Performance Evaluation of an Optical Hybrid Switching System", IEEE GLOBECOM, San Francisco, CA, 2003.
- [77] KARASARIDIS, A., HATZINAKOS, D., "Network heavy traffic modeling using α -stable self-similar process", IEEE Transactions on Communications, vol. 49, no. 7, Jul. 2001.
- [78] JUKAN, A., VEERARAGHAVAN, M., HASAN, M. Z., "Hybrid networking: evolution toward combined IP and dynamic services", Guest Editorial, IEEE Communications Magazine, p.112, May, 2011.