



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

THIAGO ANTÔNIO SIDÔNIO COQUEIRO

***FUZZY-TFRC: MECANISMO DE CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO
INTELIGENTE APLICADO EM REDES SEM FIO***

**BELÉM
2011**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO**

THIAGO ANTÔNIO SIDÔNIO COQUEIRO

***FUZZY-TFRC: MECANISMO DE CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO
INTELIGENTE APLICADO EM REDES SEM FIO***

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências da Computação ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação, da Universidade Federal do Pará, orientado pelo Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira.

**BELÉM
2011**

Coqueiro, Thiago Antônio Sidônio Coqueiro

Sobre *FUZZY-TFRC*: Mecanismo de Controle de Congestionamento Inteligente Aplicado em Redes Sem Fio / (Thiago Antônio Sidônio Coqueiro); orientador, Eduardo Coelho Cerqueira. – 2011.

74f. il. 28 cm

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Ciências Exatas e Naturais. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Belém, 2011.

1. Protocolo de aplicação sem fio (Protocolo de rede de computador). 2. TCP/IP (Protocolo de rede de computação). I. Cerqueira, Eduardo Coelho, orient. II. Universidade Federal do Pará, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. III. Título.

CDD 22. ed. 004.62

THIAGO ANTÔNIO SIDÔNIO COQUEIRO

**FUZZY-TFRC: MECANISMO DE CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO
INTELIGENTE APLICADO EM REDES SEM FIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação, defendida e aprovada em 28/02/2011, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira
Orientador – PPGCC/UFPA

Prof. Dr; Antônio Jorge Gomes Abelém
Membro Externo – PPGCC/UFPA

Prof. Dr. Agostinho Luiz da Silva Castro
Membro Externo – ITEC/UFPA

Visto: _____
Prof. Dr. Sandro Ronaldo Bezerra Oliveira
Coordenador do PPGCC/UFPA

A Deus, aos meus pais, a minha namorada e a minha irmã, pessoas fundamentais na vida, o meu alicerce e a minha razão pra nunca desistir dos meus objetivos, metas e sonhos.

AGRADECIMENTOS

As conquistas que almejamos e alcançamos no decorrer da nossa existência não são realizações compostas unicamente pelos nossos próprios esforços, pois, nos caminhos ligeiramente desconhecidos, encontramos pessoas dispostas a nos estender a mão e nos ajudar através do fornecimento de instrumentos necessários para a concretização desses objetivos, o que neste caso, é a realização desta Dissertação de Mestrado.

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a sabedoria e a força suficientes para a superação das dificuldades que surgiram, e por ter colocado em meu caminho as pessoas, que de alguma forma, contribuíram para o meu sucesso.

Aos professores e colegas do laboratório do UCNL da Universidade Federal do Pará, em especial ao Prof. Dr. Kelvin Lopes, que me acompanhou com maestria durante quase todo o meu percurso no Mestrado, e ao Prof. Dr. Eduardo Cerqueira que finalizou este ciclo, os agradeço pelo carinho e atenção dados ao meu trabalho.

Ao esforço e dedicação dos meus pais Sandra Sidônio e Geraldo Coqueiro, da irmã Cecília Sidônio, da minha namorada Josilene Cunha, dos meus amigos e familiares, que compreenderam a importância de cada etapa, assim como as minhas ausências durante este percurso, estando sempre de prontidão para me ajudar no que eu precisasse.

Agradeço a todos que contribuíram de maneira direta e indireta para a conclusão deste estudo.

O passado terminou. Devemos aprender com ele e deixa-lo ir. O futuro ainda não chegou. Devemos fazer planos, mas não perder tempo nos preocupando com eles. De nada vale nos preocupar. Quando pararmos de ruminar a respeito do que já aconteceu, quando pararmos de nos preocupar com o que talvez nunca aconteça, então estaremos vivendo o presente e começaremos a sentir a alegria de viver.

Brian Weiss

RESUMO

Fuzzy-TFRC: Mecanismo de Controle de Congestionamento Inteligente Aplicado em Redes Sem Fio

Autor: Thiago Antônio Sidônio Coqueiro
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

O TFRC utiliza um mecanismo de controle de congestionamento baseado em taxa, afim de melhor ajustar sua taxa de envio de pacotes em função do nível de congestionamento presente na rede. Porém, o mesmo não tem a capacidade de diferenciar perdas de pacotes ocasionados por congestionamento de perdas de pacotes causados por erros no enlace sem fio dentro de uma rede sem fio. Esta dissertação propõe um esquema denominado *Fuzzy-TFRC (Fuzzy TCP-Friendly Rate Control)*, que procura diferenciar essas perdas através de mecanismos de inteligência artificial baseado em lógica *fuzzy*. A proposta foi simulada no NS2 e obtiveram-se os resultados relevantes da eficácia da mesma através da métrica de vazão, justiça e Qualidade de Experiência (QoE) para avaliação de tráfego de vídeo.

Palavras-chave: Controle de Congestionamento. *Fuzzy-TFRC*. *Jitter Ratio*. Redes sem Fio.

ABSTRACT

Fuzzy-TFRC: Mechanism of Applied Intelligent Congestion Control in Wireless Networks

Author: Thiago Antônio Sidônio Coqueiro
Adviser: Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

The TFRC uses congestion control mechanism based on rate, in order to better adjust its rate of sending packets depending on the level of congestion on the network. However, it does not have the capacity to differentiate packet losses caused by congestion from packet loss caused by error wireless. This article proposes a scheme called *Fuzzy-TFRC (Fuzzy TCP-Friendly Rate Control)*, which provides to differentiate these losses through mechanisms of artificial intelligence based on *fuzzy* logic. The proposal was simulated in NS2 and obtained important results of the effectiveness of through the metric of throughput, justice and quality of experience (QoE) for evaluation of video traffic.

Keywords: Congestion Control. *Fuzzy-TFRC*. Jitter Ratio. Wireless Network.

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Nível de sensibilidade quanto à detecção de erros no enlace sem fio.....	77
GRÁFICO 2 – Desempenho em Rede Infraestruturada.....	79
GRÁFICO 3 – Rede Ad hoc com 5 Saltos.....	80
GRÁFICO 4 – Justiça em Rede Infraestruturada.....	81
GRÁFICO 5 – Justiça em Rede Ad Hoc.....	82

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Classificação das Redes Sem Fio em Função da Área de Cobertura.....	29
FIGURA 2 – Modo de Operação Infraestruturada.....	30
FIGURA 3 – Modo de Operação Ad Hoc.....	31
FIGURA 4 – Comportamento "dente de Serra" produzido pelo protocolo TCP.....	44
FIGURA 5 – Ciclo de Vida do Estabelecimento da Conexão.....	46
FIGURA 6 – Esquema do ajuste da taxa de envio.....	51
FIGURA 7 – Funções de Pertinência Utilizada pelo Sistema <i>Fuzzy</i>	57
FIGURA 8 – Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>	59
FIGURA 9 – Funcionamento Geral do <i>Fuzzy</i> -TFRC para Diferenciação de Perdas.....	61
FIGURA 10 – Comportamento do <i>Jitter Ratio</i> em Presença de Congestionamento e BER.....	62
FIGURA 11 – Entradas <i>Fuzzy</i>	64
FIGURA 12 – Saída <i>Fuzzy</i>	64
FIGURA 13 – Topologia da Rede Sem Fio Infraestruturada que Será Utilizada nas Simulações.....	69
FIGURA 14 – Topologia de Rede Sem Fio Ad hoc com Conexão via Múltiplos Saltos entre Servidor e Cliente Móvel.....	69
FIGURA 15 – Qualidade de Vídeo em Cenário Infraestruturado com 10 % de Perda.....	84
FIGURA 16 – Qualidade de Vídeo em Cenário Infraestruturado com 20 % de Perda.....	85
FIGURA 17 – Qualidade de Vídeo em Cenário Ad Hoc com 20 % de Perda e 2 Saltos.....	87
FIGURA 18 – Qualidade de Vídeo em Cenário Ad Hoc com 20 % de Perda e 5 Saltos.....	87

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Grau de Sensibilidade de Tempo de Algumas Aplicações em Rede.....	33
QUADRO 2 – Requisitos de Integridade das Principais Aplicações.....	35
QUADRO 3 – Descrição dos pacotes para estabelecimento da conexão.....	47
QUADRO 4 – Comparação dos protocolos segundo suas características.....	47
QUADRO 5 – Descrição dos módulos de identificação dos controles de congestionamento.....	49
QUADRO 6 – Descrição dos parâmetros que compõem a equação da vazão.....	52
QUADRO 7 – Variáveis Linguísticas com seus respectivos conjuntos <i>fuzzy</i>	63
QUADRO 8 – Regra de Inferência I.....	65
QUADRO 9 – Regra de Inferência II.....	66
QUADRO 10 – Parâmetros Gerais tanto para Infraestruturada quanto para Ad Hoc.....	70
QUADRO 11 – Parâmetros de Configuração do Tráfego de Vídeo.....	71
QUADRO 12 – Parâmetros utilizados pelo Tráfego Exponencial.....	72
QUADRO 13 – Parâmetros Utilizados para o Cálculo do Intervalo de Confiança.....	73
QUADRO 14 – Classificação do Teste Subjetivo MOS em Valores de PSNR.....	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Cenário Infraestruturado com 10 % de Perda por BER.....	83
TABELA 2 – Cenário Infraestruturado com 20 % de Perda por BER.....	83
TABELA 3 – Cenário Ad hoc com 2 Saltos e 20% de Perda por BER.....	85
TABELA 4 – Cenário Ad hoc com 5 Saltos e 20% de Perda por BER.....	86

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1.....	52
EQUAÇÃO 2.....	54
EQUAÇÃO 3.....	54
EQUAÇÃO 4.....	56
EQUAÇÃO 5.....	56
EQUAÇÃO 6.....	56
EQUAÇÃO 7.....	56
EQUAÇÃO 8.....	74

LISTA DE SIGLAS

AODV	<i>Ad hoc On-demand Distance Vector</i>
AP	<i>Acess Point</i>
AWND	<i>advertised window</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BS	<i>Base Station</i>
CCIDs	<i>Congestion Control Identifier</i>
CWND	<i>Congestion window</i>
DCCP	<i>Datagram Congestion Control Protocol</i>
DNS	<i>Domain Name System</i>
DSDV	<i>Destination-Sequenced Distance Vector</i>
ECN	<i>Explicit Congestion Notification</i>
E-TFRC	<i>Enhanced TFRC</i>
FR	<i>Full Reference</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
FR	<i>Full Reference - FR</i>
Fuzzy-TFRC	<i>Fuzzy TCP-Friendly Rate Control</i>
GSM	<i>Groupe Special Mobile</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Enginners</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MAC	<i>Medium Acess Control</i>
MANET	<i>Mobile Ad hoc Network</i>
MOS	<i>Mean Opinion Score</i>
MuITFRC	<i>Multiple TFRC</i>
NR	<i>No Reference</i>
PSNR	<i>Peak Signal to Noise Ratio</i>
Qoe	<i>Qualidade de Experiência</i>
QoS	<i>Qualidade de Serviço</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
RR	<i>Reduced Reference</i>

SSIM	<i>Structural Similarity Index</i>
SVH	<i>Sistema Visual Humano</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TFRC	<i>TCP-Friendly Rate Control</i>
TFRC-ASN	<i>TFRC-Adicional Sequence Number</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VOIP	<i>Voice Over Internet Protocol</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMax	<i>World wide Interoperability for Microwave Access</i>
WLANs	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 JUSTIFICATIVA.....	20
1.2 PROBLEMA.....	21
1.3 RELEVÂNCIA.....	22
1.4 OBJETIVOS.....	22
1.4.1 Objetivo Geral.....	22
1.4.2 Objetivos Específicos.....	23
1.5 TRABALHOS RELACIONADOS.....	23
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
2 TECNOLOGIA DE REDES SEM FIO.....	26
2.1 REDES SEM FIO.....	26
2.1.1 Vantagens e Desvantagens em Relação às Redes Fixas.....	26
2.1.2 Classificação.....	27
2.1.3 Padrão 802.11 em Redes Wlans.....	29
2.1.3.1 Modo de Operação em WLANs.....	30
2.2 APLICAÇÕES MULTIMÍDIA.....	31
2.2.1 Requisitos.....	32
2.2.1.1 Grau de Sensibilidade ao Tempo.....	33
2.2.1.2 Tolerância a Perdas.....	34
2.2.2 Classificação dos Fluxos Multimídia.....	35
3 PROTOCOLOS PARA APLICAÇÕES MULTIMÍDIAS.....	37
3.1 PRINCÍPIOS DO CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO.....	37
3.2 TIPOS DE MECANISMO DE CONTROLE.....	38
3.2.1 Controle de Congestionamento Baseado em Janela.....	38
3.2.2 Controle de Congestionamento Baseado em Equação.....	38
3.3 PROTOCOLOS APLICADOS PARA APLICAÇÕES MULTIMÍDIA.....	39
3.3.1 UDP.....	39
3.3.1.1 Principais Características do protocolo UDP.....	40
3.3.1.2 O uso do Protocolo UDP em Aplicações Multimídia.....	40
3.3.2 TCP.....	40
3.3.2.1 Características do Protocolo TCP.....	41
3.3.2.2 Controle de Congestionamento do Protocolo TCP.....	41

3.3.2.3 O uso do Protocolo TCP em Aplicações Multimídia.....	43
3.3.3 DCCP.....	44
3.3.3.1. Especificação.....	44
3.3.3.2 Características.....	45
3.3.3.3 Estabelecimento Confiável da Conexão.....	45
3.3.3.4 Comparação entre DCCP, TCP e UDP.....	47
3.3.3.5 Mecanismos de Controle de Congestionamento do DCCP.....	48
3.3.4 CCID-3 (TFRC).....	50
3.3.4.1 Funcionamento.....	50
3.3.4.2 Equação da Vazão do TFRC.....	51
3.3.4.3 Problemas do Protocolo DCCP-TFRC em Redes Sem Fio.....	52
4 MODELAGEM DO PROTOCOLO FUZZY-TFRC.....	54
4.1 <i>JITTER RATIO</i>	54
4.2 FUNDAMENTOS DA LÓGICA <i>FUZZY</i>	55
4.2.1 Definição.....	55
4.2.2 Conjunto <i>Fuzzy</i>.....	55
4.2.3 Grau de Pertinência.....	56
4.2.4 Função de Pertinência.....	57
4.2.5 Variáveis <i>Fuzzy</i> e Linguísticas.....	57
4.2.6 Regras de Inferências.....	58
4.2.7 Sistema <i>Fuzzy</i>.....	58
4.3 DESCRIÇÃO DO <i>FUZZY-TFRC</i>	59
4.3.1 Funcionamento Geral do Protocolo.....	60
4.3.2 Estratégia de Ação do <i>Fuzzy-TFRC</i>.....	61
4.3.3 Cálculo para Comparação dos Valores Tamanho e Magnitude.....	62
4.3.4 Composição do Sistema <i>Fuzzy</i> Diferenciador de Perda.....	63
4.3.4.1 Entradas e Saídas.....	63
4.3.4.2 Definição das Regras de Inferência.....	65
5 METODOLOGIA PARA A SIMULAÇÃO.....	67
5.1. PROCESSO DE SIMULAÇÃO.....	67
5.2 FERRAMENTA PARA A SIMULAÇÃO.....	68
5.3 TOPOLOGIAS PARA AS SIMULAÇÕES.....	68
5.4 PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DAS TOPOLOGIAS.....	70
5.4.1 Modelo de Erro para as Topologias.....	71
5.4.2 Configuração do Tráfego Principal.....	71
5.4.3 Tráfego de Fundo.....	72

5.5 PROCEDIMENTOS PARA A EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES.....	72
5.6 COLETA DE DADOS.....	73
5.7 MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.....	74
5.7.1 Métricas para a Avaliação da Qualidade de Serviço.....	74
5.7.2 Métricas para a Avaliação da Qualidade de Experiência.....	75
6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE.....	77
6.1 AVALIAÇÃO DO GRAU DE SENSIBILIDADE.....	77
6.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO.....	78
6.3 ANÁLISES DO NÍVEL DE JUSTIÇA.....	81
6.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA.....	82
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

Com o rápido desenvolvimento das tecnologias de comunicação, aumento no número de dispositivos sem fio e de aplicações multimídia para a Internet, vem aumentando a disseminação das redes sem fio, e, dessa forma, as aplicações multimídia como IPTV (*Internet Protocol Television*), *streaming* de vídeo, vídeo conferência, entre outros, estão cada vez mais presentes no âmbito pessoal ou profissional dos usuários dos serviços móveis.

Entretanto, diante da predominância dos conteúdos multimídia nas redes sem fio, são necessárias novas soluções para o controle de congestionamento nesses ambientes devido ao aumento na demanda por banda passante exigida por estas aplicações e serviços, pois, caso contrário, a qualidade do serviço e a experiência do usuário podem sofrer degradações em função do aumento no retardo da transmissão e perda de dados decorrentes do congestionamento.

Grande parte do tráfego dessas aplicações multimídia é transmitida utilizando o protocolo de transporte UDP (*User Datagram Protocol*), que não fornece um controle de congestionamento nativo. Em geral, a ausência de um mecanismo regulador é responsável pelo aumento de tráfego na rede (FLOYD, et al., 2006), e, além disso, esse protocolo concorre injustamente com os demais fluxos que possuem políticas de controle de congestionamento, como por exemplo, fluxos do tipo TCP (*Transmission Control Protocol*) (MONTANER, 2005).

Nesse sentido, o protocolo DCCP (*Datagram Congestion Control Protocol*) foi proposto como alternativa ao protocolo UDP para aplicações multimídias, pois implementa controle de congestionamento de maneira não confiável, isto é, não tem retransmissão de segmentos que ocasionam aumento do atraso de pacotes, como ocorre com o protocolo TCP. Um dos mecanismos de controle de congestionamento utilizado pelo DCCP é o TFRC (*TCP-Friendly Rate Control*), que apresenta uma política baseada na equação, onde o transmissor ajusta sua taxa de transmissão de acordo com as informações enviadas pelo receptor.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os equipamentos sem fio são largamente utilizados em âmbito comercial, fazendo com que as comunicações pela *internet* estejam presentes em toda a parte, como por exemplo, em dispositivos móveis (celulares, notebooks, *palm-tops*, e outros). A popularização da tecnologia sem fio está fazendo com que ocorra um aceleração da integração da *internet* no mundo todo, tendo como destaque nessa integração o crescimento do uso das aplicações multimídia em ambiente sem fio (*wireless*).

Os principais fatores que justificam a popularização das aplicações multimídia, assim como sua elevada demanda por serviços desse tipo, foram: desenvolvimento de bibliotecas específicas para equipamentos que detém pouco poder de processamento, como por exemplo, os próprios dispositivos móveis; a evolução na construção de *hardwares* cada vez menores e, sobretudo, com maior poder de processamento e armazenamento; e a redução quanto ao custo, resultando na fácil disponibilização da tecnologia móvel e sem fio.

O aumento da demanda por serviços do tipo multimídia tem preocupado a comunidade científica (FLOYD; et al., 2006), no que se diz respeito ao modo como os dados desses serviços são transmitidos nas redes, pois grande parte desse tráfego multimídia é transmitida utilizando o tradicional protocolo UDP, que não fornece um controle de congestionamento capaz de controlar a taxa de transmissão desses dados na rede. Sendo que, a ausência de um mecanismo controlador no UDP, é a principal consequência que contribui para o aumento de tráfego na rede, principalmente na internet.

Em meio a isto surge o DCCP, que é uma alternativa ao protocolo UDP, pois, apesar de terem características semelhantes, o DCCP tem como diferencial o fato de possuir diversos mecanismos de controle de congestionamento. Este protocolo foi proposto para ser voltado às aplicações de tempo real e multimídia, isto é, visando suprir as exigências de qualidade e desempenho necessárias para o bom funcionamento dessas aplicações.

As principais exigências necessárias para que as aplicações multimídia funcionem de maneira adequada, tanto no aspecto de desempenho de seu tráfego na rede quanto ao seu nível de qualidade observada por usuários que o usufruem, está no fato delas dependerem da continuidade do tráfego de fluxos de dados, ou

seja, para um funcionamento adequado de vídeo. Por exemplo, o fator variação de tempo (atraso) de chegadas de pacotes para o receptor é crucial, pois quanto maior a variação de atraso entre pacotes que chegam ao receptor, menor será o nível de qualidade de vídeo observada pelo usuário.

Dessa forma, o TFRC, caracterizado como um dos principais mecanismos de congestionamento nativo do DCCP foi proposto para suprir as exigências das aplicações multimídia em redes cabeadas, mas ele não funciona adequadamente em ambientes de redes sem fio, pois, quando o protocolo detecta qualquer perda de pacotes, o mesmo irá considerar sempre que tal perda foi devido um problema de congestionamento. O TFRC quando utilizado em uma rede sem fio, não diferencia os tipos de perdas de pacotes nesse ambiente, ou seja, não consegue distinguir uma situação de congestionamento de um problema ocasionado por erros de transmissão.

Então em redes cabeadas, o mecanismo do TFRC funciona bem, porém em redes sem fio, ele calcula sua taxa de envio de forma inadequada, pois cada vez que ocorre uma perda de pacote, ele desconsidera que tal perda seja uma perda causada por erros de enlace sem fio, visto que esses tipos de falhas não são caracterizados como problemas de congestionamento, não sendo necessário variar ou ajustar a taxa de envio. O cálculo inadequado da taxa de envio em ambientes sem fio interfere no funcionamento dos serviços multimídia, principalmente no atraso entre pacotes, ocasionando, por exemplo, problemas na qualidade de áudio e vídeo nessas redes.

Assim o desenvolvimento do protocolo *Fuzzy-TFRC (TCP-Friendly Rate Control)* para redes sem fio é de grande viabilidade quanto aspecto de complexidade de construção, pois será um protocolo simples, devido ser baseado no original protocolo TFRC, isto é, o *Fuzzy-TFRC* será visto simplesmente como um TFRC otimizado para redes sem fio (*wireless*).

1.2 PROBLEMA

O TFRC foi planejado somente para redes cabeadas, onde, nelas, é baixa a probabilidade de eventos que ocasionem altas taxas de erros de bit (BER - *Bit Error Rate*). Dessa forma, nesses ambientes, o TFRC considera que qualquer perda é decorrente de congestionamento. Por outro lado, em se tratando de ambientes de

redes sem fio onde o canal de comunicação sofre com constantes desconexões na comunicação e interferências, ocorrem valores elevados para o BER. Diante dessa realidade, constata-se que o TFRC não detém um mecanismo inteligente capaz de diferenciar entre perdas devido ao congestionamento e erros no enlace sem fio. Dessa forma, o presente estudo estará focalizado no seguinte problema: *como fazer para que o TFRC diferencie perda de pacotes causada por congestionamento de perdas originadas por erros de transmissão no enlace sem fio?*

1.3 RELEVÂNCIA

As redes sem fio são ambientes que possuem vários problemas de transmissão como interferências de sinal e constantes desconexões, então fazer com que o protocolo TFRC seja capaz de oferecer suporte para as aplicações multimídia em um ambiente de rede sem fio é de suma relevância, pois contribui para o crescimento da *internet* no mundo em relação à integração de usuários a ela. A construção de uma proposta baseada no TFRC que apresente técnicas que possibilitem minimizar esses obstáculos para manter os bons níveis de qualidade em serviços multimídia, certamente contribuirá para os avanços tecnológicos aplicados nesses ambientes, assim como para a comunidade acadêmica e científica em geral.

A importância dessa pesquisa visa desenvolver uma proposta baseada no protocolo TFRC, que estará voltado para suprir as exigências das aplicações multimídia, garantindo um aceitável nível de qualidade de serviço superior quando comparado com o próprio TFRC em ambiente *wireless*.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

- Desenvolver para redes sem fio um novo protocolo na camada de transporte denominado de *Fuzzy-TFRC*, que é um baseado no TFRC e que diferenciará as perdas por congestionamento das de falhas de transmissão por meio da métrica de *Jitter Ratio* e de um sistema de inteligência artificial baseado na lógica *fuzzy*. O *Fuzzy-TFRC* empregará o *Jitter Ratio* para estimar o tamanho da fila de pacotes em um roteador para avaliar o nível de congestionamento

presente na rede sem fio, isto é, os valores de *Jitter Ratio* servirão de guia para o sistema *fuzzy* decidir se uma determinada perda de pacote ocorreu em consequência de um congestionamento ou não.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o grau de detecção (acurácia) de diferenciação de perdas do *Fuzzy-TFRC*;
- Avaliar o nível de justiça (*throughput fairness*) do *Fuzzy-TFRC* quando competindo com fluxos concorrentes provenientes do protocolo TCP;
- Analisar o desempenho da proposta em nível de desempenho quando comparada com outros protocolos utilizados para diferenciar perdas de pacotes;
- Computar o desempenho do *Fuzzy-TFRC* no nível de Qualidade de Experiência (QoE – *Quality of Experience*).

1.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Este subtópico apresenta os trabalhos presentes na literatura e que envolvem temas relacionados à proposta da dissertação quanto aos mecanismos destinados a diferenciar perda de pacotes por congestionamento de perda por erros no enlace sem fio. Primeiramente, aborda-se o funcionamento dos mecanismos de cada proposta, e, em seguida, a diferença do *Fuzzy-TFRC* perante tais propostas.

De acordo com Lee e Choi (2007), o *TFRC-ASN* (*TFRC Adicional Sequence Number*) é uma proposta baseada no *TFRC* e que utiliza uma abordagem fundamentada na divisão da conexão, onde a transmissão fim a fim é dividida em um enlace fixo e em outro sem fio.

O trabalho de Luo et. al (2009) realiza melhoramentos no *TFRC* integrando-o com as camadas de aplicação e física, no intuito de melhorar o desempenho de fluxos de vídeo em redes *mesh* com múltiplos saltos usando uma abordagem *cross-layer*.

O *TFRC-JR* (*TFRC Jitter Ratio*) é uma proposta destinada para redes infraestruturadas construída por Li et al. (2006), que diferencia as perdas através das medições via métrica de *Jitter Ratio* e do modelo de alisamento exponencial

simples. O *Jitter Ratio* serve para estimar o tamanho da fila de pacotes em um roteador, e o alisamento exponencial simples utiliza os dados fornecidos pelo *Jitter Ratio* para predizer se um dado pacote está na fila ou não de um roteador. Diante disto, se o pacote estiver na fila o problema da perda é por erro no enlace sem fio, e se estiver fora dela, a perda é por congestionamento.

O AJR-TFRC (*Adaptive Jitter Ratio* TFRC), proposto por Coqueiro (2006) é uma proposta semelhante ao TFRC-JR, porém, a diferença está em seu modelo exponencial que é adaptativo (*Trigg & Leach*), sendo um protocolo voltado para redes *ad hoc*. A implementação do TFRC-JR e AJR-TFRC utilizou uma abordagem baseada na modificação do protocolo TFRC.

O TFRC-ASN apresenta a desvantagem de que boa parte da complexidade da implementação é realizada na estação base, quebrando a semântica fim a fim do controle de congestionamento. A vantagem do Fuzzy-TFRC perante o TFRC-ASN é a de continuar mantendo uma abordagem fim a fim (semelhante ao TFRC base) e também de possuir mecanismos de controle de congestionamento que não dependem da infraestrutura da rede. Além disso, tanto o AJR-TFRC quanto a proposta *cross-layer* de Luo, são protocolos que foram desenvolvidos somente para redes do tipo *ad hoc* com múltiplos saltos, assim como o TFRC-JR que foi construído apenas para redes infraestruturadas, então, o mecanismo implementado no Fuzzy-TFRC foi desenvolvido para se adaptar tanto em redes do tipo *ad hoc* como nas infraestruturadas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação é dividida em sete capítulos, além das referências bibliográficas.

No capítulo 2, são abordados os conceitos envolvendo as redes sem fio, onde serão apresentados um visão geral sobre esta tecnologia, destacando suas vantagens, desvantagens, classificações. Também serão exibidos os conceitos envolvendo as aplicações multimídias, com destaque nas suas características, requisitos e também em relação aos ambientes de redes sem fio.

No capítulo 3 são oferecidos os principais conceitos relacionados aos protocolos da camada de transporte, dando ênfase aos seus mecanismos de

controle de congestionamento e também ao protocolo TFRC que é pertencente ao protocolo DCCP.

No capítulo 4 é descrito o processo de modelagem do protocolo proposto, descrevendo cada componente participante. No quinto capítulo é abordado sobre os procedimentos adotados na metodologia de simulação, com a finalidade de testar o desempenho do *Fuzzy-TFRC* em redes sem fio.

No capítulo 6 é apresentada a análise dos resultados, isto é o seu desempenho com base em simulações.

Nas Considerações Finais encontram-se a análise final dos resultados e as conclusões a partir da pesquisa experimental realizada através das simulações.

2 TECNOLOGIA DE REDES SEM FIO E AS APLICAÇÕES MULTIMÍDIAS

Neste capítulo é apresentada uma visão geral sobre a tecnologia de redes sem fio e as aplicações multimídias.

Em relação à tecnologia de comunicação sem fio ou *wireless*, será descrita a sua classificação quanto a áreas de cobertura, dando ênfase aos ambientes classificados como WLANs (*Wireless Local Area Network*), além do seu padrão de especificação denominado de 802.11, sendo eles os objetos que fizeram parte da pesquisa e da proposta documentada nesse trabalho.

Já em relação às aplicações multimídias serão abordados os requisitos necessários para alcance de uma maior qualidade de serviço. Além disso, serão esboçadas comparações entre diversos tipos de serviços multimídia em relação aos seus respectivos níveis de sensibilidade ao atraso, e também comparações com diferentes aplicações ou serviços que visam à integridade dos dados, e por fim, será apresentada a classificação dos fluxos multimídias.

2.1 REDES SEM FIO

Um conceito inicial foi necessário para a melhor compreensão acerca da tecnologia de redes sem fio. Então o termo “sem fio”, significa que a conexão para transmissão de informações ocorre via ar, ou seja, sem a utilização de fios ou cabos (par trançado ou fibra ótica). Dessa forma, uma rede sem fio é um conjunto de sistemas conectados entre si via faixas de frequências do espectro eletromagnético (rádio, micro-ondas e infravermelho), com o objetivo de permitir a comunicação ou transmissão de dados entre dispositivos situados em locais diferentes.

2.1.1 Vantagens e Desvantagens em Relação às Redes Fixas

Segundo Bulhman & Cbianca (2006), as redes que utilizam a tecnologia sem fio apresentam algumas vantagens perante as redes fixas. Estas vantagens são:

a) Flexibilidade: quando permite que suas redes alcancem lugares onde os fios ou cabos não poderiam chegar, como por exemplo, em ambientes hostis (como a floresta amazônica) que são de difícil acesso.

b) Mobilidade: os dispositivos eletrônicos (*notebook*, celulares, *smartphones*, entre outros) podem acessar e usufruir de uma rede sem fio sem depender de cabos de comunicação, facilitando a locomoção dos usuários que estão de posse desses equipamentos.

c) Facilidade: é outro ponto positivo da tecnologia sem fio, principalmente na facilidade na sua instalação, pois não necessita utilizar fios ou cabos de conexão, o que permite o uso mais eficiente do espaço físico, pois não é necessário alterar a infraestrutura desses espaços para a criação das redes. Outra facilidade é que nelas podem ser criadas ou configuradas várias topologias para atender a um determinado fim específico, onde tais topologias podem ser facilmente alteradas, expandidas e com reduzidas manutenções.

Agora, em se tratando de desvantagens, destacam-se:

a) Qualidade de serviço: a qualidade de serviço prestada é menor do que a das redes cabeadas, pois a pequena largura de banda e a elevada taxa de erro (devido ao nível de interferências) dentro de uma rede *wireless* são as principais causas que fazem com que o nível de qualidade desse serviço seja menor do que em relação a uma rede fixa.

b) Custo: outra desvantagem está no custo dos equipamentos serem maiores do que nas redes cabeadas.

c) Transferência de Dados: possui uma baixa taxa de transferência de dados devido a sua limitada largura de banda de 54 Mbits/s. Ao passo que, em uma rede fixa, sua largura está na faixa de *Gigabits* por segundo.

2.1.2 Classificação

As redes sem fio podem ser classificadas de acordo com a área de cobertura, através das quais os dados são transmitidos, que são:

a) WPAN (*Wireless Personal Area Network*): é uma rede de pequena área de cobertura ou de baixo alcance que normalmente é utilizada para interligar dispositivos eletrônicos fisicamente próximos entre si. É ideal para a troca de informações entre os dispositivos situados nas proximidades de uma pessoa, e também na eliminação de cabos usualmente utilizados para conectar telefones, mouse, teclado e impressoras. Os padrões de comunicação utilizados pelas redes pessoais são: o *Bluetooth* (IEEE 802.15.1), o *Spice*, Ir DA e Home RF.

b) WMAN (*Metropolitan Area Network*): é uma tecnologia de redes que permite a interligação entre computadores que estão localizados em uma área metropolitana. Sua área de cobertura tem o alcance de cinquenta quilômetros e utiliza o padrão denominado de WiMax (*World wide Interoperability for Microwave Access – IEEE 802.16*) (HOSSAIN, 2007), que é uma tecnologia de rede sem fio bastante utilizada em edifícios e espaços universitários, principalmente servindo como cópia de segurança nos casos em que as linhas de troca de dados para redes com fio estiverem indisponíveis.

c) WWAN (*Wireless Wide Area Network*): é uma tecnologia que pode ser utilizada em grandes áreas geográficas, isto é, permitindo cobrir cidades ou países por meio de antenas ou satélites espalhados em locais estratégicos. As WWAN são geralmente propriedades de prestadores de serviços, sendo que a tecnologia GSM (*Group Special Mobile – Segundo Geração de Padrão de Telefonia Móvel*) e 3G (*Terceira Geração de Padrão de Telefonia Móvel*) são exemplos de padrões para WWAN.

d) WLAN (*Wireless Local Area Network*): é uma rede local que utiliza rádio frequência (RF) para fazer a conexão entre dispositivos ou computadores dentro de um mesmo ambiente. Ela pode existir isoladamente ou servir como extensão para uma estrutura cabeada do tipo LAN (*Local Area Network*). A WLAN é a categoria de rede que usa o popular Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), que é um padrão que utiliza uma área de cobertura inferior a 100 metros, contando com várias frequências e velocidades. O próprio Wi-Fi (IEEE 802.11) é o padrão de comunicação utilizado pelas redes sem fio locais.

A proposta deste trabalho ganhou ênfase a partir da rede WLAN, a qual serviu de cenário para as simulações. O motivo da escolha desta estrutura foi devido ela ser bastante utilizada em âmbito comercial e nas pesquisas acadêmicas e científicas. Então, tal popularidade do uso dessa tecnologia incentivou na sua utilização para a proposta desse trabalho. A Figura 1 esquematiza a classificação em função de suas respectivas áreas de coberturas:

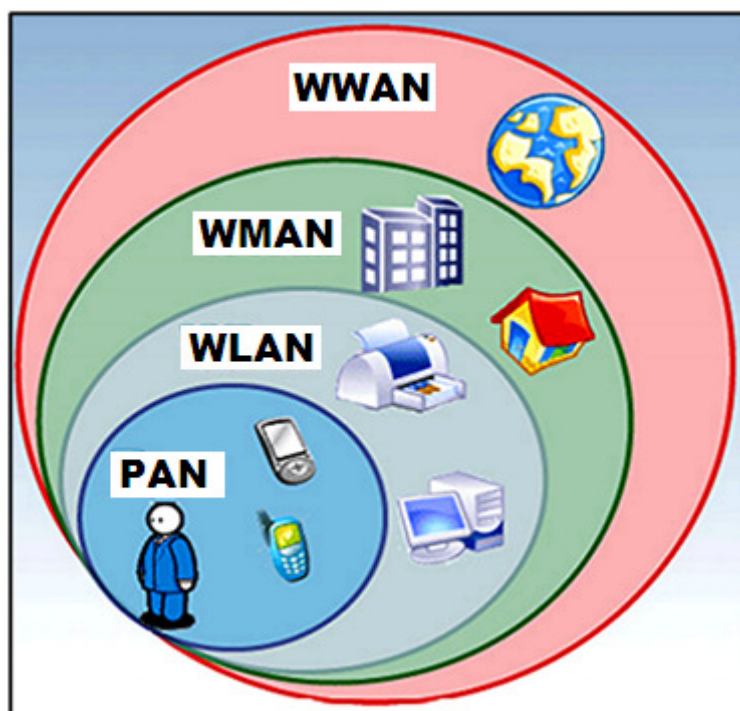


FIGURA 1 – Classificação das Redes Sem Fio em Função da Área de Cobertura

Fonte: Dados da pesquisa

2.1.3 Padrão 802.11 em Redes Wlans

O padrão 802.11 é um conjunto de padrões representados pela família 802.X, e estão documentados e disponibilizados pelo IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Enginners*). O 802.11 especifica o mecanismo de controle de acesso ao meio (*Medium Acess Control – MAC*) para redes sem fio, disponibilizando a conectividade entre os dispositivos fixos (cabeados), portáteis e móveis dentro de uma rede local. O padrão 802.11 possui diferentes versões, e as principais são:

- a) 802.11b: popularmente conhecido de Wi-Fi. Opera na faixa de 2.4 GHz, com alcance de 100 metros e taxa de transmissão de 11 Mbits/s.
- b) 802.11a: provê transmissão a 54 Mbits/s na frequência de 5.8 GHz, sendo cinco vezes mais rápido que a transmissão 802.11b.
- c) 802.11g: oferece uma taxa de transmissão de 54 Mbits/s em 2.4 GHz. Sendo assim, um padrão proposto para se beneficiar das altas taxas de transmissão do padrão 802.11a e de ser compatível com o 802.11b.

2.1.3.1 Modo de Operação em WLANs

Há dois modos de operação adotados pelas WLANs e que adotam o padrão 802.11, que são o modo de operação infraestruturada e o Ad Hoc (MANET).

- Infraestruturada: em uma rede com infraestrutura, a transferência de dados acontece sempre entre uma estação móvel e um ponto de acesso denominado de AP (*Acess Point* ou *Base Station*), onde os APs são responsáveis pela captura e retransmissão de mensagens enviadas pelas estações móveis, isto é, a transferência de dados não ocorre diretamente entre as estações, e sim por intermédio da *base station* que centraliza a conexão de diversos clientes, assim, o modo infraestruturado é também conhecido como topologia ponto-multiponto. A comunicação direta entre o AP e estação móvel permite que a conexão seja feita usando um único salto (*single hop*), sem a necessidade de roteamento nesse tipo de rede. O AP também pode funcionar com uma ponte entre uma rede sem fio e uma rede cabeada, resultando em uma rede do tipo heterogênea com dois ambientes diferentes (ambiente cabeado junto com o sem fio). A Figura 2 esquematiza a formação desse tipo de rede.

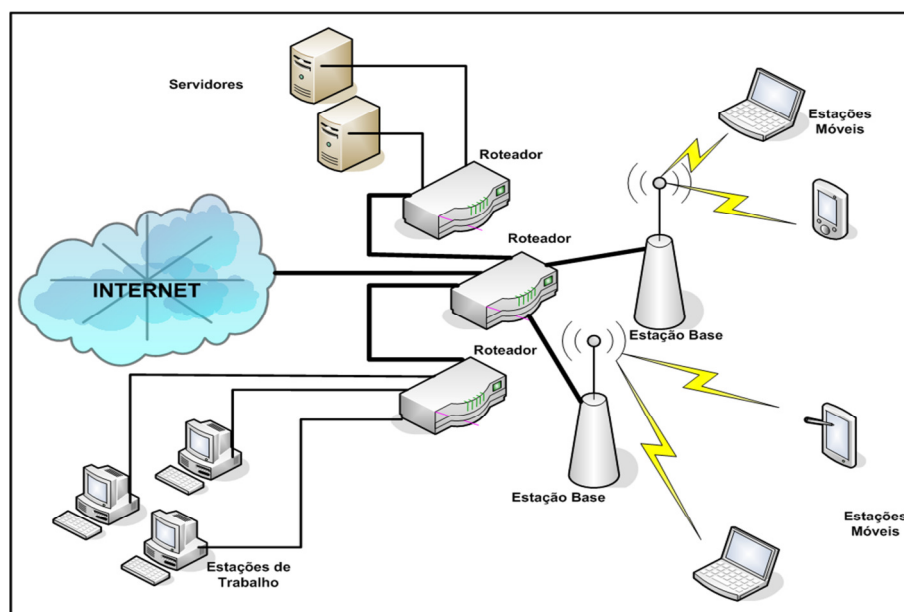


FIGURA 2 – Modo de Operação Infraestruturada

Fonte: Dados da pesquisa

- Ad Hoc ou MANET (*Mobile Ad hoc Network*): é uma rede utilizada para situações específicas em que os problemas são resolvidos de maneira improvisada, explicando melhor, ela permite que dispositivos móveis possam formar uma rede em áreas onde não há uma infraestrutura pré-definida de comunicações. As redes Ad hoc não necessitam de nenhuma infraestrutura para funcionar, ou seja, as estações se comunicam diretamente com a outra. Não há a necessidade que uma informação passe por um nó centralizador de conexões (AP). Uma estação “A” só pode se conectar com uma estação “B” se a mesma estiver dentro do raio de cobertura de ação da “A”, ou se existir uma ou mais estações intermediárias entre “A” e “B” que possam encaminhar a mensagem até o destino (no caso, o “B”). A Figura 3 apresenta o esquema de uma rede do tipo MANET.

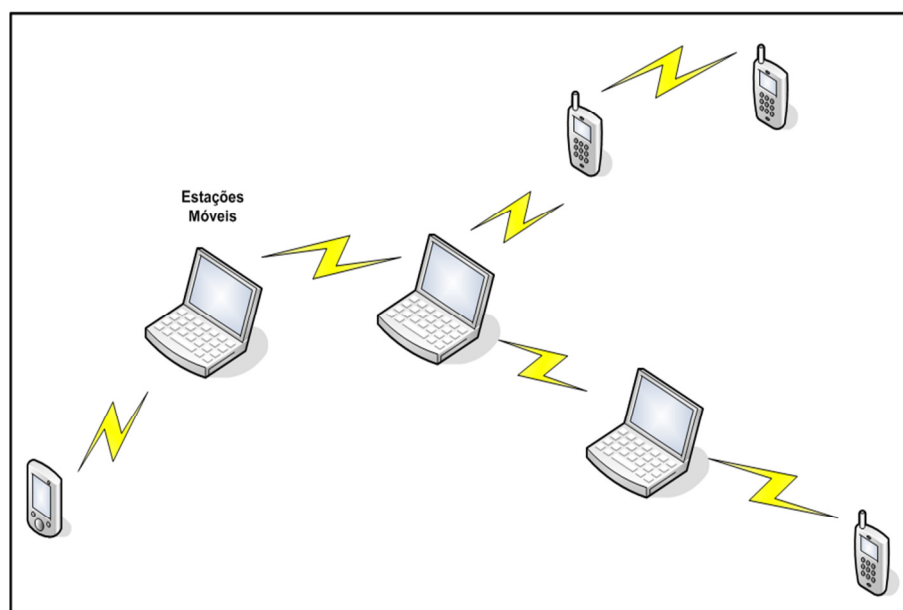


FIGURA 3 – Modo de Operação Ad Hoc

Fonte: Dados da pesquisa

2.2 APLICAÇÕES MULTIMÍDIA

Com o rápido desenvolvimento das tecnologias de comunicação e das redes de computadores, as redes sem fio vêm crescendo largamente em âmbito comercial, sendo que nessas redes cresceu nos últimos anos o uso de serviços do tipo

multimídia, como IPTV (TV por IP), *streaming* de vídeo, vídeo conferência, entre outras.

Os principais fatores que justificam a popularização das aplicações multimídia, assim como sua elevada demanda por serviços desse tipo, foram: desenvolvimento de bibliotecas específicas para equipamentos que detêm pouco poder de processamento, como por exemplo, os próprios dispositivos móveis; a evolução na construção de *hardwares* cada vez menores e, sobretudo com maior poder de processamento e armazenamento; e a redução quanto ao custo, resultando na fácil disponibilização da tecnologia móvel e sem fio.

2.2.1 Requisitos

Os requisitos ou requerimentos importantes para que uma determinada aplicação multimídia mantenha uma boa qualidade de seu serviço em uma rede, é, sem dúvida, o fator do próprio tempo. O tempo é importante porque essas aplicações são extremamente sensíveis ao atraso ou retardo de seus pacotes na rede. Diante do exposto, a seguir serão definidos os principais requisitos fundamentais que influenciam no nível de qualidade das aplicações multimídias quanto ao fator tempo.

a) Latência: a latência ou atraso é o tempo que um pacote leva da origem até o destino em uma determinada rede. As aplicações multimídias são sensíveis ao atraso, isso significa que, um pacote contendo conteúdo multimídia necessita de um tempo limite de transmissão para chegar até o destino em uma transmissão, pois, caso ultrapasse o limite de tempo, então a informação transmitida será inútil para o receptor do referido pacote, isto é, caso o atraso seja muito elevado, a interatividade pretendida pela aplicação fica prejudicada.

Supondo, como exemplo, uma conversa através da rede ou internet entre duas pessoas via aplicação VOIP (*Voice Over Internet Protocol*). À medida que o atraso aumenta, as respostas tendem a se entrelaçar, isto é, um das pessoas envia uma mensagem de voz e não sabe se o outro participante a ouviu, então continua falando continuamente, ao passo que o outro participante, não ouvindo a chegada da mensagem de voz enviada, resolve então enviar suas mensagens de voz a outra pessoa continuamente também, fazendo com que as informações enviadas entre

tais participantes fiquem entrelaçadas, resultando na falta de interação entre os diálogos.

b) *Jitter*: as redes não conseguem garantir uma entrega de pacotes de dados de forma constante até o destino devido às alterações frequentes nas condições dos roteadores presentes na rede. Então, o *jitter* é o requisito responsável pela variação estatística do atraso que altera o fluxo de chegadas dos pacotes na rede. Isso significa que as aplicações multimídias necessitam que seus tráfegos de pacotes tenham uma taxa constante de entrega, pois, variações elevadas de atrasos (*jitter*) afetam a interatividade do serviço multimídia, devido tornar a transmissão inviável para essas aplicações. Então, considerar apenas o requisito da latência não será suficiente para definir a qualidade de uma transmissão necessária para o tráfego multimídia.

2.2.1.1 Grau de Sensibilidade ao Tempo

De modo geral, a sensibilidade ao tempo não atinge todas as aplicações multimídias de forma homogênea, isto é, a sensibilidade ao tempo está diretamente relacionada à interatividade pretendida para a aplicação. Dessa forma, uma aplicação pode apresentar um requisito de sensibilidade ao tempo maior do que outras. O Quadro 1 apresenta o nível de sensibilidade de algumas aplicações multimídias em rede, em função dos seus requisitos de fatores críticos (latência e *jitter*).

QUADRO 1 – Grau de Sensibilidade de Tempo de Algumas Aplicações em Rede

	VOIP (Voz sobre IP)	IPTV (TV sobre IP)	Videoconferência
Latência	Sensível	Sensível	Sensível
<i>Jitter</i>	Sensível	Sensível	Sensível
Largura de Banda	Baixa	Alta	Alta

No caso das aplicações de IPTV, ela apresenta flexibilidade quanto aos valores de latência, devido na maioria dos casos, os usuários não acharem relevante os atrasos entre a ocorrência real do evento em relação ao momento em que esse evento está sendo exibido, porém, essa aplicação necessita de rigor quanto aos valores de *jitter*, pois ela necessita que sua exibição de áudio e vídeo apresente valores de atrasos fixos para melhor sincronismo, e de preferência, com elevadas larguras de banda.

Já as aplicações envolvendo telefonia e videoconferência, são bem semelhantes por apresentarem as mesmas características de requisito de qualidade, mas somente diferenciando os requisitos de largura de banda, pois a tecnologia VOIP apenas necessita de uma menor largura de banda em comparação as aplicações de videoconferência para uma melhor interatividade com o usuário.

2.2.1.2 Tolerância a Perdas

Em geral, as aplicações multimídias são bastante sensíveis ao atraso fim-a-fim e também nas próprias variações do mesmo (*jitter*), porém, são tolerantes a perda de dados em uma transmissão, pois suas perdas podem ser aliviadas ou até anuladas, tendo reduzida influência no conteúdo a ser transmitido. Isso quer dizer que, mesmo parte da informação transmitida seja perdida, ocorre apenas uma queda na qualidade de apresentação da transmissão dependendo da quantidade de dados perdidos e do método utilizado para a codificação dos dados.

Portanto, as aplicações orientadas a dados como o HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), FTP (*File Transfer Protocol*), *e-mail*, DNS (*Domain Name System*), e outros, possuem requisitos de qualidade de serviços diferentes aos das aplicações multimídias, pois os requisitos de qualidade de transmissão das aplicações orientadas a dados necessitam que suas informações sejam transmitidas de forma completamente confiável, ou seja, sem perda de informação, onde a integridade dos dados é de extrema importância. O Quadro 2 descreve os requisitos de confiabilidade e largura de banda das principais aplicações em redes de computadores.

QUADRO 2 – Requisitos de Integridade das Principais Aplicações

Aplicação	Largura de Banda	Sensibilidade ao Atraso	Tolerância a Perdas
Áudio em Tempo Real	Baixa	Sim	Tolerante
Vídeo em Tempo Real	Alta	Sim	Tolerante
Jogos via Rede	Média	Sim	Tolerante
Transferência de Arquivos	Alta	Não	Não
E-mail	Baixa	Não	Não
Documentos Web	Baixa	Não	Não

Fonte: KUROSE, 2006

2.2.2 Classificação dos Fluxos Multimídia

As redes de computadores comportam uma grande variedade de aplicações multimídias e, apesar dessas aplicações apresentarem características semelhantes, também possuem diferenças de acordo com a interatividade suportada e com o modo como seus fluxos são gerados e transportados. Assim, de acordo com Kurose (2006), a classificação dos fluxos multimídias está dividida nas seguintes categorias que estão descritas abaixo:

a) Fluxos de Áudio e Vídeo Armazenados: nessa categoria, um cliente realiza uma solicitação de arquivos de áudio e vídeo sob demanda, que estão armazenados em um servidor, sendo que essa classe possui três tipos de características principais:

- **Mídia Armazenada:** como o conteúdo foi pré-gravado e armazenado em um determinado servidor, o usuário poderá realizar operações de assistir, ouvir, pausar, avançar e retroceder a mídia para o ponto do conteúdo que ele desejar.
- **Fluxo Contínuo (*Streaming*):** o usuário recebe o conteúdo requisitado por ele através de um servidor, de maneira instantânea, isto é, o usuário poderá ver o conteúdo de áudio e vídeo ao mesmo tempo em que o indivíduo faz a

requisição de partes do mesmo conteúdo no qual será visualizado ou processado mais adiante.

- Reprodução Contínua: funciona quando a execução da mídia ou conteúdo inicia de acordo com o tempo original de gravação, ou seja, os dados do conteúdo deverão chegar ao destino no período de tempo programado de serem visto corretamente pelo cliente.

b) Fluxos de Áudio e Vídeo ao Vivo: permite a transmissão ao vivo de áudio e vídeo pela internet. Nessa categoria, o cliente não pode realizar operações de retroceder o conteúdo transmitido.

c) Áudio e Vídeo em Tempo Real Interativo: este tipo de aplicação multimídia permite que o usuário se comunique um com outro em tempo real. A Aplicação de videoconferência e também a de voz sobre IP (VOIP) são exemplos desse tipo de aplicação multimídia.

3 PROTOCOLOS PARA APLICAÇÕES MULTIMÍDIAS

Neste capítulo serão apresentados os principais protocolos da camada de transporte que são utilizados atualmente pelas aplicações multimídias, destacando suas principais funcionalidades e características referentes aos mecanismos de controle de congestionamento adotados.

A justificativa da criação deste capítulo foi a de apresentar o bom uso do protocolo DCCP (*Datagram Congestion Control Protocol*) quando utiliza o mecanismo de congestionamento TFRC (*TCP-Friendly Rate Control*) perante os protocolos tradicionais UDP (*User Datagram Protocol*) e TCP (*Transmission Control Protocol*) em serviços multimídias. Porém, ao final, serão descritos os problemas do protocolo TFRC quando utilizado em redes sem fio, os quais serviram de principal desafio para esta dissertação.

3.1 PRINCÍPIOS DO CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO

De modo geral, as redes de computadores oferecem recursos limitados, como por exemplo, uma restrita largura de banda e tamanho limitado das filas de roteadores em que são armazenados os pacotes à espera de transmissão. Então, quando o número de pacotes é superior ao limite máximo de pacotes na fila em um roteador, têm como consequência os descartes dos pacotes excedentes. Logo, o frequente descarte de pacotes em uma rede caracteriza-se como um problema de congestionamento, ou seja, o número de pacotes transmitidos excede a capacidade disponível de largura de banda da rede.

Assim sendo, foi necessário definir meios para controlar a congestionamento da rede, e estes se deram na adoção de mecanismos de controle de congestionamento a fim de minimizar os prejuízos causados por esse fenômeno. Os sistemas de congestionamento podem ser vistos como um algoritmo de controle que objetiva evitar a sobrecarga de dados na rede através do controle da taxa de envio de pacotes.

3.2 TIPOS DE MECANISMO DE CONTROLE

Basicamente, existem dois tipos de métodos fundamentais para controle de congestionamento em função da taxa de transmissão de dados: o controle de congestionamento baseado em janela e o controle de congestionamento baseado em equação, onde seus conceitos serão descritos abaixo (PETERSON; DAVIE, 2004).

3.2.1 Controle de Congestionamento Baseado em Janela

Este tipo de algoritmo de controle utiliza um limitador de taxa de transmissão conhecido como "janela", que equivale a uma fatia da transmissão total. O funcionamento dessa abordagem funciona da seguinte forma: a janela de controle representa o limite de pacotes que podem ser transmitidos, isso significa que enquanto o número de pacotes enviados for menor que o tamanho da janela, o transmissor pode ainda enviar mais dados na rede até que o número de pacotes seja igual ao tamanho da janela.

Vale ressaltar que, conforme o transmissor continua recebendo pacotes de confirmação (pacotes do tipo ACK – *acknowledgements*) por parte do receptor, o remetente poderá então tomar a decisão de aumentar o tamanho da sua janela limitadora de transmissão, permitindo realizar o aumento da sua taxa de envio de pacotes. Agora, caso esse emissor não receba nenhum pacote de confirmação, o algoritmo irá considerar que a referida não confirmação seja devido a ocorrência de um congestionamento na rede, logo, o mecanismo de controle fará a redução do tamanho da janela atual a fim de diminuir a sua taxa de transmissão para se adaptar às condições da rede, e, dessa forma, um exemplo de protocolo da camada de transporte que utiliza esse algoritmo de controle é o TCP.

3.2.2 Controle de Congestionamento Baseado em Equação

Realiza a manipulação da taxa de transmissão utilizando uma equação de controle que calcula o número de bits por segundos que poderão ser absorvidos ou suportados pelo receptor e pela rede. O ajuste da taxa de envio pela equação de controle é realizado da seguinte maneira: o receptor envia relatórios para o emissor

através de pacotes de confirmação, onde os relatórios contêm informações referentes ao tráfego da rede. O emissor, de posse dos dados do determinado relatório, poderá então utilizá-los dentro da equação para efetivar o cálculo da taxa em função da capacidade da rede.

Os valores das taxas de envio ajustados pela equação tem caráter conservativo, apresentando reduzidas variações entre valores, isto é, fazendo com que esse mecanismo de controle seja mais apropriado para as aplicações que são sensíveis a variações constantes e bruscas do aumento e diminuição da taxa de transferência de dados na rede, e como exemplo de protocolo que utiliza esse mecanismo de controle, tem-se o TFRC.

3.3 PROTOCOLOS APLICADOS PARA APLICAÇÕES MULTIMÍDIA

A camada de transporte é o núcleo de toda a hierarquia de protocolos. Sem ela, o conceito de protocolos em camada faria pouco sentido. A sua principal função é promover uma transferência de dados confiável, eficiente e econômica a seus usuários.

Nesse sentido, a internet tem dois principais protocolos de transporte, um sem conexão e outro orientado a conexão. O protocolo sem conexão é o UDP e o protocolo orientado a conexão é o TCP, mas, recentemente, surgiu outro protocolo de transporte, o DCCP. O DCCP é um protocolo não confiável como o UDP, mas provê controle de congestionamento como o TCP, sendo que ele pode ser facilmente estendido para suportar múltiplos mecanismos de controle de congestionamento.

3.3.1 UDP

O UDP, definido na RFC 768 (POSTEL, 1980), é um protocolo pertencente da camada de transporte que faz a transmissão de dados entre o *host* emissor e o outro receptor de forma não confiável. O UDP permite a transferência de dados sem precisar estabelecer uma conexão, ou seja, sem necessitar estabelecer uma sessão, antes que os dados sejam transferidos, entre os *hosts* de origem e destino.

3.3.1.1 Principais Características do protocolo UDP

Ele é considerado como um protocolo simples, pois não implementa muitas funcionalidades comparado com os protocolos TCP e DCCP. Suas principais funcionalidades são:

- Realização de transmissões tanto *unicast* quanto *multicast*.
- Não é um protocolo orientado à conexão, isto é, não realiza a troca de informações de controle para o início da transmissão.
- Não implementa um serviço de garantia de entrega de dados quando ocorre perda de pacotes na rede.
- Não implementa mecanismos de controle de congestionamento.

3.3.1.2 O uso do Protocolo UDP em Aplicações Multimídia

O protocolo UDP é muito utilizado para aplicações multimídias por ser mais adequado para fluxos de dados sensíveis ao fator tempo. Em se tratando da sensibilidade ao tempo, o UDP faz com que as diferenças das latências de cada pacote sejam muito pequenas.

Apesar de ser um protocolo com bom desempenho para transmissões multimídias, apresenta como desvantagem o fato de não possuir controle de congestionamento. A falta de uma política de controle de congestionamento faz com que ele seja desleal com outros fluxos que concorrem pela banda passante com ele. Isso significa que, ao competir em um mesmo *link* com outros fluxos, as aplicações que usam o UDP provocam a diminuição dos rendimentos dos outros fluxos que possuem mecanismo de congestionamento, como por exemplo, os fluxos do tipo TCP. Então, o uso constante do protocolo UDP para as aplicações multimídias é perigoso para as redes, resultando assim, em frequentes problemas de congestionamento de pacotes (NAVARATNAM; et al., 2006).

3.3.2 TCP

O TCP é um protocolo da camada de transporte que foi projetado para prover um fluxo de *bytes* fim a fim confiável em uma inter-rede não confiável. Na verdade, o protocolo oferece serviços capazes de proporcionar uma garantia para que

datagramas cheguem aos seus destinos e em ordem, por meio de uma rede heterogênea adequando-se dinamicamente a ela. O TCP está definido formalmente na RFC 793 (POSTEL, 1981). Com o passar dos anos vários erros e inconsistências foram detectados e muitos requisitos foram alterados. Esclarecimentos e soluções são descritos na RFC 1122 (BRADEN, 1989) e extensões na RFC 1323. (JACOBSON; et al., 1992).

3.3.2.1 Características do Protocolo TCP

O TCP é um protocolo orientado à conexão e todos os serviços são obtidos quando o transmissor e o receptor criam pontos extremos, isto é, os *hosts* trocam mensagens de controle para estabelecer uma conexão de três fases (fase de início, envio de dados e encerramento da conexão). A finalidade da característica de orientação à conexão é a de alocar recursos necessários para a troca de dados de maneira confiável, a fim de garantir que todos os dados sejam entregues sem erros e na ordem correta do recebimento de pacotes para o destino.

Todas as conexões TCP são *full-duplex* e ponto a ponto. O *Full-duplex* quer dizer que o tráfego pode ser feito em ambas as direções e ao mesmo tempo. Ponto a ponto significa que cada conexão possui exatamente dois pontos terminais.

Outras características deste protocolo é seu suporte para controles fluxos, de congestionamento e retransmissão de dados.

3.3.2.2 Controle de Congestionamento do Protocolo TCP

Segundo Tanenbaum (2002), o congestionamento ocorre quando a carga oferecida a qualquer rede é maior que a sua capacidade. O controle de congestionamento do TCP é um mecanismo classificado como uma política de controle baseada em janela, e este mecanismo é realizado, principalmente, por dois algoritmos: *Slow Start* (Inicialização Lenta) e *Congestion Avoidance* (Coibição de Congestionamento). Para Nascimento (2004), apesar de serem independentes, esses algoritmos são geralmente implementados de forma conjunta. Em seguida, encontra-se uma breve descrição da funcionalidade de cada um deles.

a) Algoritmo de Partida Lenta (*Slow Start*): de acordo com Nascimento (2004), o algoritmo de inicialização lenta (*Slow Start*) é um mecanismo do TCP desenvolvido

para iniciar ou reiniciar uma transmissão. O objetivo do algoritmo é o de elevar gradualmente a taxa de transmissão do tráfego na rede até que uma situação de equilíbrio seja atingida. Nesse algoritmo, tem-se o uso de uma nova janela para o transmissor chamada de “janela de congestionamento” (*cwnd – congestion window*).

No início de uma transmissão ou após uma perda de pacote o valor de *cwnd* é equivalente a um segmento. Para cada ACK recebido, a janela de congestionamento dobra de tamanho, o que representa o número de bytes que pode ser transmitido. Para permitir novas transmissões, o transmissor deve considerar o tamanho da janela como o mínimo entre a janela fornecida pelo receptor (*awnd – advertised window*) no *three-way handshake* à janela de congestionamento, calculada pelo transmissor.

O nó transmissor inicia a transmissão com um segmento e espera o recebimento do respectivo ACK. Quando o ACK é recebido, a janela de congestionamento é aumentada de um para dois segmentos, e dois segmentos podem ser injetados na rede. Quando cada um destes dois segmentos for confirmado, a janela de congestionamento é aumentada para quatro segmentos. Apesar do seu nome, o algoritmo *slow start* proporciona um crescimento exponencial para a janela de transmissão até que o valor de *cwnd* se iguale a *wnd*, ou até que ocorra um *timeout* (expiração do tempo de transmissão).

A finalidade do algoritmo de *slow start* é aumentar a janela exponencialmente para que a taxa de transmissão alcance um valor aceitável na rede, assim, a janela continua aumentando até que ocorra um momento de evento de perda. Neste momento, o tamanho da janela passa a ser o valor da metade do seu valor atual. Quando é detectado um evento de perda de pacote, o TCP considera que tal perda foi decorrente de um problema de congestionamento, então, o TCP aciona outro algoritmo de controle, o mecanismo de coibição de congestionamento (*Congestion Avoidance*).

b) Algoritmo de Prevenção de Congestionamento (*Congestion Avoidance*): se durante a execução do *slow start* ocorrer um evento de congestionamento que force um ou mais pacotes a serem descartados, o algoritmo *congestion avoidance* é utilizado para diminuir a taxa de transmissão. Os algoritmos *congestion avoidance* e *slow start* são independentes e têm objetivos distintos. Mas, quando ocorre um congestionamento é necessário diminuir a taxa de transmissão dos pacotes na rede e utilizar o algoritmo *slow start* para reiniciar o processo de transmissão. Na prática,

esses algoritmos são implementados em conjunto, e para o trabalho conjunto desses algoritmos, três variáveis são utilizadas: a janela do receptor, a janela de congestionamento e um limiar para *slow start* definido como *sthresh* (*slow start threshold*) (NASCIMENTO, 2004).

Quando ocorre um *timeout*, o limiar é definido como a metade da janela de congestionamento atual, e a janela de congestionamento é redefinida como um segmento máximo. O algoritmo de início lento é chamado para começar a transmitir a partir desse segmento até alcançar o limiar. A partir daí, o crescimento da janela de congestionamento é constante de um segmento para cada rajada até alcançar a janela do receptor, quando para de crescer e permanece constante enquanto não ocorrer um *timeout* ou o receptor não mudar a sua janela.

Diferente do algoritmo *slow start* que aumenta a janela de congestionamento de forma exponencial, o algoritmo *congestion avoidance* representa um crescimento linear de no máximo um segmento por RTT.

3.3.2.3 O uso do Protocolo TCP em Aplicações Multimídia

Segundo Peterson & Davie (2004), o protocolo TCP não é adequado para ser utilizado em aplicações de tempo real, pois ele possui a principal característica de ser confiável. Devido o TCP ser confiável na entrega de seus segmentos, a sua política de retransmissão de pacotes perdidos ou fora de ordem prejudica o desempenho das aplicações de tempo real por ocasionar o aumento do retardo nas transmissões. Outro motivo que justifica o TCP em não ser apropriado para as aplicações multimídias é o comportamento de “dente de serra” que o seu algoritmo de controle de congestionamento produz, e, na verdade, isso significa que a taxa de transmissão está continuamente subindo e descendo de forma brusca, sendo mais apropriado para os serviços multimídia que a taxa apresente um comportamento uniforme por um intervalo de tempo longo para que se produza reduzidos retardos. A Figura 4 apresenta o comportamento da taxa de transmissão do TCP em função do tempo.

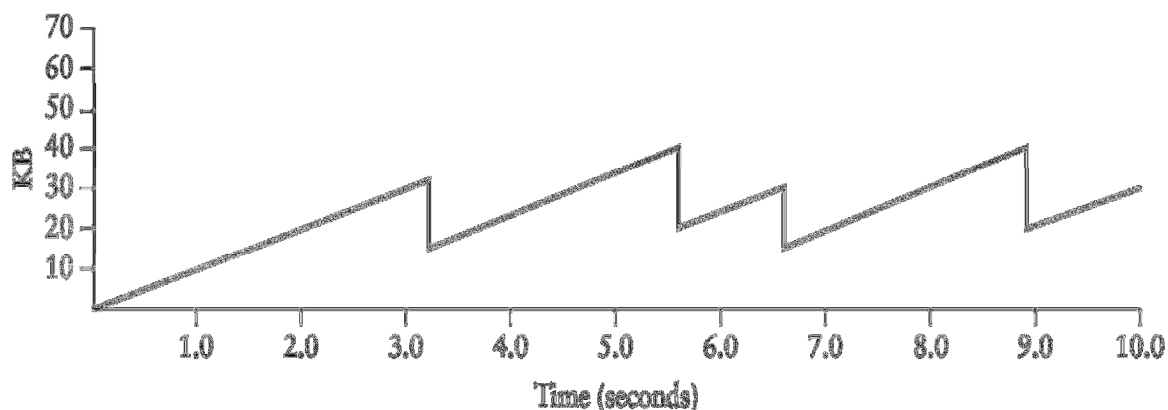


FIGURA 4 – Comportamento "dente de Serra" produzido pelo protocolo TCP

Fonte: PETERSON, 2006

3.3.3 DCCP

O DCCP, definido através da RFC 4340 (FLOYD; et al., 2006), é um protocolo pertencente a camada de transporte que foi projetado para fornecer controle de congestionamento para conexões ou tráfego não confiável. Ele foi proposto visando substituir o protocolo UDP devido o próprio não possuir nenhum mecanismo nativo de controle de congestionamento.

3.3.3.1. Especificação

O protocolo DCCP é especificado pela IETF e sua especificação foi dividida em RFCs, tais como: o RFC 4336 (FLOYD; et al., 2006), que apresenta as motivações da criação desse protocolo; a RFC 4340 (FLOYD; et al., 2006), que descreve as especificações do DCCP e gerenciamento dos seus algoritmos de controle de congestionamento; e por fim, as RFCs 4341 (FLOYD; KOHLER, 2006a) e 4342 (FLOYD; et al., 2006), que detalham respectivamente os dois mecanismos de controle de congestionamento (TCP-Like e TFRC) nativos do DCCP, onde serão explicados mais adiante.

3.3.3.2 Características

O DCCP tem como fato marcante a importância de ser conhecido como um *framework*, isto é, esse protocolo oferece para as aplicações opções de algoritmos de controle de congestionamento, com a finalidade de uma determinada aplicação escolher o algoritmo que mais atende as suas necessidades.

Dessa forma, as principais características desse protocolo são:

- É um protocolo *unicast* e com fluxos bidirecionais de dados;
- Seus fluxos de dados são do tipo não confiáveis, mas com confirmação de recebimento de pacotes (do tipo ACK);
- Estabelecimento de conexão confiável (política de estabelecimento de conexão semelhante ao TCP), a qual é estabelecida através de um mecanismo de três vias denominadas de *three-way handshake*, isso quer dizer que tal conexão realiza um ciclo de vida com início e término. Esta característica será vista em detalhes no subtópico 4.3.3.3.
- Tem a característica de negociação com confirmação, onde, ao estabelecer uma conexão confiável, uma aplicação pode fazer a negociação da escolha do algoritmo de controle de congestionamento;
- Incorpora o suporte a notificação ECN (*Explicit Congestion Notification*), descrito na RFC 3168. O ECN permite que os receptores recebam notificações por parte dos roteadores quando houver a possibilidade de eventos de congestão de pacotes no caminho percorrido pelos pacotes na rede.

3.3.3.3 Estabelecimento Confiável da Conexão

O estabelecimento da conexão (*three-way handshake*) do DCCP é semelhante ao desempenhado pelo protocolo TCP, e ocorre quando há um pedido de conexão fim-a-fim entre dois computadores, sendo um cliente e o outro um servidor. A diferença entre o modo de conexão confiável do DCCP em relação ao TCP reside em como eles as empregam na rede, e, no caso do DCCP, o mesmo a utiliza principalmente para realizar o procedimento de característica de negociação da escolha de um determinado algoritmo de controle congestionamento, já no caso

do TCP, o mesmo cria a sua conexão com a finalidade de garantir a entrega de seus dados até o seu destino.

O processo de estabelecimento de conexão do DCCP se inicia quando o computador cliente envia um pedido de conexão para o computador servidor, e o mesmo realiza a confirmação do recebimento realizando o envio de um pacote específico, ou seja, o nome do pacote para pedido de conexão chama-se de *DCCP-Request* e o de confirmação de recebimento é denominada de *DCCP-Response*, então, a partir desse momento, a conexão entre cliente e servidor é estabelecida. Após o estabelecimento, os dois computadores trocam dados entre si através de pacotes do tipo *DCCP-Data* e *DCCP-Data Ack*. Para que haja a finalização da conexão, o servidor envia um pacote do tipo *DCCP-CloseReq*, caso o cliente deseje finalizar, o mesmo envia um pedido através do pacote *DCCP-Close*. Ao término da conexão, o servidor envia ao cliente um pacote *DCCP-Reset* para informar a ele que a conexão foi finalizada com sucesso, então, nesse ponto, o cliente fica em estado de espera (TIMEWAIT) a fim de receber eventuais pacotes de conexão ainda em trânsito pela rede. A Figura 5 esquematiza o funcionamento do *three way handshake* entre cliente e servidor. O Quadro 3 conceitua os pacotes presentes no estabelecimento.

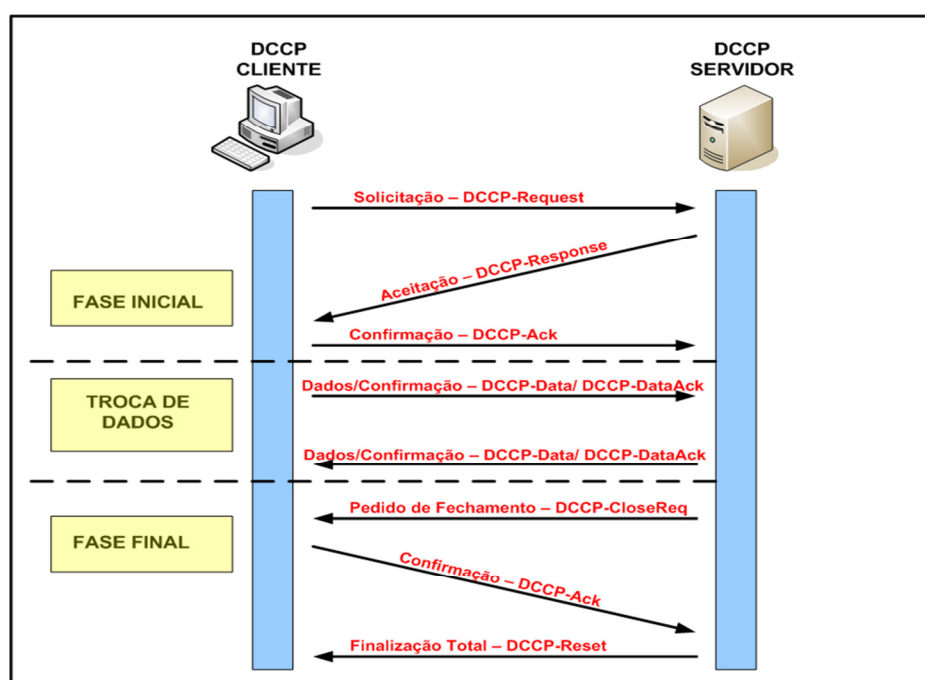


FIGURA 5 – Ciclo de Vida do Estabelecimento da Conexão

Fonte: Dados da Pesquisa

QUADRO 3 – Descrição dos pacotes para estabelecimento da conexão

Tipo	Função	Descrição
0	Request	Pedido do cliente para estabelecer conexão com o servidor
1	Response	Confirmação do servidor ao pedido de estabelecimento da conexão
2	Data	Utilizado para transmissão de dados
3	Ack	Confirmação de recebimento de pacote
4	DataAck	Transmitem dados e também confirma recebimento de pacotes no mesmo datagrama
5	CloseReq	Pedido do servidor ao cliente para que o mesmo encerre a conexão
6	Close	Pedido solicitado tanto pelo servidor quanto pelo cliente para solicitação de encerramento da conexão.
7	Reset	Utilizado para encerrar a conexão de forma incondicional
8	Sync	Usado para sincronizar números de sequência após perda de pacotes em rajada
9	SyncAck	Realiza a sincronia e também confirmação de recepção
10-15	Reserved	Reservado para uso futuro pelo DCCP

Fonte: Dados da Pesquisa

3.3.3.4 Comparação entre DCCP, TCP e UDP

Neste item serão apresentadas as diferenças mais importantes entre os protocolos, conforme ilustra o Quadro 4.

QUADRO 4 – Comparação dos protocolos segundo suas características

Características	UDP	TCP	DCCP
Tamanho Genérico do Cabeçalho	8 bytes	20 bytes	12 ou 16 bytes
Orientação na Transmissão	Datagramas	Segmentos	Datagramas
Numeração da porta	Sim	Sim	Sim
Detecção de Erros nos Dados	Opcional	Sim	Opcional
Garantia de Entrega dos Dados	Não	Sim	Não
Número de Sequência	Não	Sim	Sim
Ordenação	Não	Sim	Não
Controle de Erros	Não	Sim	Não
Controle de Fluxos	Não	Sim	Sim
Controle de Congestionamento	Não	Sim	Sim
Suporte a ECN	Não	Sim	Sim

Fonte: Dados da Pesquisa

Analisando o quadro acima, um ponto interessante entre o protocolo TCP e DCCP são os seus modos de transmissão, ou seja, o motivo que faz com que o TCP transmita seus dados através de segmentos se deve ao fato de ser voltado para aplicações que dependem que seus dados sejam entregues de forma confiável, ao contrário do DCCP e UDP, que foram voltados para aplicações com entrega de dados não confiável, portanto, não necessitando de garantia na entrega dos dados. Porém, o DCCP somente necessita que seus dados sejam entregues até o destino de forma confiável quando existe o procedimento da característica de negociação no momento do estabelecimento da conexão.

3.3.3.5 Mecanismos de Controle de Congestionamento do DCCP

Cada mecanismo de controle de congestionamento apoiado pelo DCCP é atribuído um congestionamento identificador de controle, ou CCID. Os CCIDs (*Congestion Control Identifier*) são módulos que são responsáveis em realizar o controle de congestionamento durante o período de conexão (*three way handshake*) entre cliente e servidor.

Através do mecanismo de característica de negociação, o algoritmo pode ser escolhido pela aplicação no momento do estabelecimento da conexão e também se pode negociar pela troca de outro algoritmo de congestionamento, então, a flexibilidade na utilização dos algoritmos em uma conexão DCCP é muito importante, pois, a característica de um tráfego em uma determinada direção de uma conexão (cliente até servidor) pode ser diferente de um tráfego apresentado para direção contrária (conexão do servidor para o cliente), sendo assim, o seu mecanismo de negociação pode ter a flexibilidade de injetar na rede mecanismos de controle de congestionamento diferentes para ambos os lados, em função da característica dos tráfegos.

Nesse contexto, a principal justificativa de haver um gerenciamento dos módulos de CCIDs propostos pelo DCCP, é a de que se pode utilizar um algoritmo mais apropriado para um determinado tipo de aplicação, ou seja, na escolha de algoritmos próprios para aplicações sensíveis ao atraso ou na mudança de outros mecanismos mais adaptados para aplicações elásticas.

Oficialmente, o DCCP contém dois CCIDs que são o *TCP-Like Congestion Control* (identificado como CCID-2) e o *TFRC* (com identificação de CCID-3)

(FLOYD; KOHLER, 2007). No protocolo DCCP também podem ser inclusos outros CCIDs, onde as possíveis adições poderão ser inseridas nas faixas de identificação entre zero e um ou também entre cinco e duzentos e cinquenta e cinco. O Quadro 5 apresenta as faixas de reservas para novos algoritmos e as já preenchidas.

QUADRO 5 – Descrição dos módulos de identificação dos controles de congestionamento

CCID	Descrição
0	Reservado
2	<i>TCP-Like</i>
3	<i>TCP-Friendly Rate Controle</i>

Fonte: Dados da Pesquisa

Nesse sentido, são descritos os dois mecanismo de controles utilizados pelo DCCP, mas o algoritmo do TFRC é o que contém maiores detalhes, pois é o de grande interesse para esse trabalho.

a) *TCP-Like Congestion Control* – CCID-2: é um mecanismo de controle de congestionamento similar ao algoritmo de controle do TCP (FLOYD; KOHLER, 2006a). Devido o DCCP ser um protocolo não confiável, existe algumas diferenças entre o CCID-2 e o TCP em termos de implementação, ou seja, tanto o TCP como o TCP-Like utilizam uma janela de congestionamento no transmissor com a finalidade de limitar o envio de grande quantidade de segmentos não reconhecidos. Porém, o CCID-2 não possui a capacidade de utilizar Acks acumulativos igual ao TCP, pois esse tipo de abordagem se faz sentido em protocolos confiáveis (como o próprio TCP)

O CCID-2 é indicado para aplicações que precisam enviar o máximo de dados possíveis em um curto intervalo de tempo e que também sejam aptas a utilizar de toda a largura de banda disponível. Exemplos de aplicações multimídias que melhor se adaptam ao CCID-2 são os jogos *on line* (NIVOR, 2005).

b) *TCP-Friendly Rate Control (CCID-3)*: é um mecanismo de controle baseado em equação, onde sua principal finalidade é a de minimizar mudanças bruscas na

taxa de transferência em resposta aos eventos de perda, e esta implementação é indicada para aplicações que geram tráfego de pacotes de maneira contínua. O CCID-3 é definido na RFC 4342 (FLOYD; KOHLER, 2006b), e o seu funcionamento está descrito de forma detalhada no tópico abaixo, sendo que, a justificativa de se realizar uma descrição detalhada desse mecanismo se deve ao fato de que ele foi utilizado como base para a criação da proposta do *Fuzzy-TFRC*.

3.3.4 CCID-3 (TFRC)

O mecanismo do protocolo TFRC está especificado na RFC 3448 (PADHYE; WIDMER, 2003). O TFRC, na realidade, não é considerado um protocolo de transporte, porém, um mecanismo de controle que pode ser usado por um protocolo da camada de transporte, como no caso o DCCP. Por ser classificado como um mecanismo baseado em equação, ele produz a função de limitar a sua taxa de transferência com base nos parâmetros da rede para evitar colapsos de congestão na mesma.

3.3.4.1 Funcionamento

De acordo com Padhye & Widmer (2003), para que o protocolo necessite descobrir as condições atuais do tráfego na rede, o estilo de medições que ele utiliza é caracterizado como fim a fim, ou seja, o estado da rede é estimado via comunicação emissora e receptora, onde, o último envia relatórios de informações contidas em parâmetros que servirão de base para conhecer as condições da rede, e por fim, estimar um valor de taxa de envio adequado para esse ambiente. A Figura 6 esboça o esquema de conexão entre os computadores emissor e receptor.

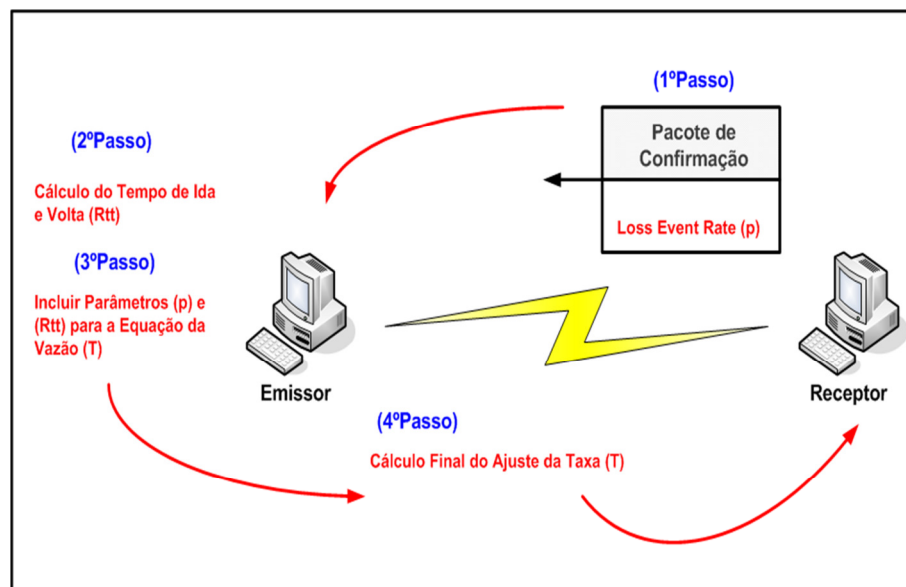


FIGURA 6 – Esquema do ajuste da taxa de envio

Fonte: Dados da Pesquisa

O remetente transmite até o destinatário pacotes de dados com uma velocidade específica de transmissão por unidade de tempo. Na recepção dos pacotes no destino, o receptor envia para a origem pacotes de confirmações contendo informações sobre a taxa de pacotes perdidos (*loss event rate*), e quando o emissor receber o relatório do receptor, o mesmo calcula o valor estimado do RTT (*round Trip Time*) que é o tempo de ida e volta. Resumindo, os principais valores estimados, como o RTT e o *loss event rate*, servirão de parâmetros para a equação da vazão.

3.3.4.2 Equação da Vazão do TFRC

Uma das principais metas que o protocolo TFRC pretende alcançar é obter a capacidade de apresentar um comportamento amigável com o TCP – comportamento caracterizado como *TCP-Friendly*. O TFRC anseia por competir na rede por largura de banda com o protocolo TCP de maneira amigável ou justa, isto significa dizer que este mecanismo de controle deseja alcançar uma produtividade de forma semelhante ao TCP. Assim, deduz-se que o *TCP-Friendly Rate Control* usará uma metodologia para também conhecer a produtividade estimada do próprio TCP, isto é, ele irá utilizar uma equação de controle de taxa de transmissão que terá duas funções: a de ajustar uma taxa compatível às condições da rede, e ao mesmo

tempo, a de ser justa quando concorre com fluxos TCP por largura de banda. A equação 1 é uma versão baseada da equação da vazão do TCP Reno.

$$T = \frac{s}{RTT \cdot \sqrt{\frac{2p}{3}} + 4 \cdot RTT \left(3 \cdot \sqrt{\frac{3p}{8}} \right) \cdot p \cdot (1 + 32 \cdot p^2)} \quad (1)$$

A descrição de cada componente da equação está descrita no Quadro 6 abaixo:

QUADRO 6 – Descrição dos parâmetros que compõem a equação da vazão

Parâmetros	Descrição
T	Valor ajustado da taxa de envio em <i>bytes</i> por segundos
S	Tamanho ou comprimento do pacote em <i>bytes</i>
RTT	<i>Round trip time</i> ou tempo de ida e volta estimado em segundos
p	<i>Loss event rate</i> ou taxa de eventos de perda variando os valores entre 0 e 1.

Fonte: Dados da Pesquisa

3.3.4.3 Problemas do Protocolo DCCP-TFRC em Redes Sem Fio

O CCID-3 é um protocolo voltado para aplicações sensíveis ao atraso, utilizando como parâmetro para ajuste da taxa de envio a taxa de eventos de perda. Entretanto, o TFRC foi projetado para ser utilizado pelas redes do tipo cabeadas, e não sendo planejado para dar suporte para infraestruturas com tecnologia sem fio. Isto explica que, em redes cabeadas o aumento das perdas de pacotes é ocasionado fortemente por problemas de congestionamento, pois a probabilidade de ocorrências de bits com erros nesse canal são muito pequenos, então, nesse ambiente, o TFRC considera que qualquer detecção de perdas de pacotes sejam ocasionadas, predominantemente, por congestão no tráfego.

Agora, em se tratando de ambientes de redes sem fio, onde o canal de comunicação sofre constantemente com desconexões na comunicação,

interferências e *handoffs*, esses problemas geram para o canal de comunicação uma elevada taxa de erros nos bits ou BER. Então, sempre que o TFRC detecta alguma perda dentro de uma rede sem fio, irá sempre considerar que a referida perda seja ocasionada por congestionamento na rede, não considerando que a causa seja motivada por elevado BER (*Bit Error Rate*), logo, esse protocolo não detém um mecanismo inteligente capaz de diferenciar esses tipos de perdas, isto é, perdas por congestionamento de perdas por elevada taxa de erros de bit no enlace sem fio.

Citando como exemplo, supõe-se que o motivo de uma determinada perda de pacotes seja fruto de erros no canal de comunicação, então, quando o TFRC detecta essa perda, a sua tomada de decisão é ativar rapidamente a sua equação para ajustar a sua taxa de envio com o intuito de se ajustar às condições da rede. O problema é que elevadas BER não são qualificadas como um evento de congestionamento, não sendo necessário diminuir a taxa de pacotes por segundo, e, logo, ele acaba por ajustar a sua taxa de transferência de forma incorreta e desnecessária, fazendo com que haja perda do seu desempenho na rede sem fio.

4 MODELAGEM DO PROTOCOLO FUZZY-TFRC

Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais sobre a lógica *Fuzzy* e também sobre a métrica de *Jitter Ratio*. Em seguida, será explicado o esquema de modelagem e funcionamento do protocolo *Fuzzy-TFRC*.

4.1 JITTER RATIO

Um evento de congestionamento pode ser caracterizado quando uma determinada fila de pacotes ultrapassa o limite permitido por um roteador, ocasionando o descarte de pacotes pelo mesmo, logo, quanto maior o descarte, maior o congestionamento.

O *Jitter Ratio* é definido como o cálculo que estima o tamanho da fila de pacotes em um roteador para prever o nível do congestionamento (LI; et al., 2006). Essa métrica é derivada do *Jitter* ou *Inter-arrival Jitter*, proposto na RFC 1889 (SCHULZRINNE; et al., 1996), que tem a função de medir a variação do atraso entre pacotes consecutivos, conforme a Equação 2:

$$D = (R_x - R_y) - (S_x - S_y) = (R_x - S_x) - (R_y - S_y) \quad (2)$$

Onde, “ R_x ” é o tempo atual da chegada de um pacote até o receptor; “ S_x ” é o tempo de envio atual do pacote pelo emissor; “ R_y ” e “ S_y ” são os tempos de recebimento e envio dos pacotes anteriores, respectivamente. Então, assume-se que o *Jitter Ratio* seja definido da seguinte maneira:

$$Jr = \frac{D}{R_x - R_y} \quad (3)$$

Sendo a variável “ Jr ” o valor do *Jitter Ratio*, “ D ” o Jitter, “ R_x ” é o tempo de recebimento do pacote atual e, finalmente, “ R_y ” o tempo do pacote recebido anteriormente.

4.2 FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY

Segundo a lógica aristotélica, a construção do raciocínio tem sido composta de forma binária, isto é, o emprego da lógica de Aristóteles leva em consideração que uma conclusão pode ser exclusivamente falsa ou verdadeira. Nessa lógica clássica, os elementos de um conjunto, por exemplo, são classificados de forma bem definida (*Crisp Value*), onde cada elemento pode pertencer ou não a um determinado grupo ou conjunto (*Crisp Set*). Porém, esse tipo de lógica não toma em consideração que a conclusão de um raciocínio pode ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa, ou seja, na realidade, muitos dos pensamentos ou experiências de natureza humana não podem ser classificados exclusivamente como verdadeiros ou falsos, sim ou não, *bit* um ou *bit* zero. Por exemplo, como classificar exatamente, “O carro está muito rápido ou lento?”, “O garoto é muito baixo ou baixo?”, ou “O congestionamento da rede está relativamente alto ou baixo?”, isto quer dizer que, expressões como “muito baixo”, “relativamente alto” e “muito rápido”, são informações vagas, onde é impreciso se classificar como totalmente verdadeiro ou falso. Assim, de maneira mais objetiva, a ferramenta capaz de trabalhar com informações imprecisas ou vagas é a denominada lógica nebulosa ou *Fuzzy*.

4.2.1 Definição

A lógica nebulosa é uma estrutura de lógica proposta pelo professor Zadeh (1965) como forma de modelar a incerteza na linguagem natural, isto é a representação das informações vagas se dará através da utilização de conjuntos *fuzzy*.

4.2.2 Conjunto *Fuzzy*

A teoria clássica dos conjuntos (*Crisp Theory*) explica que os elementos são classificados como pertencentes ou não pertencentes a um determinado conjunto do universo, isto significa que sempre trará como resultado, a existência de uma função bem definida quando em relação a um dado subconjunto “A”, um elemento “x”, que está definido em um conjunto universo “U”, somente apresentará dois estados: “1” se e somente se pertence ao conjunto “A” ou “0” se e somente se não pertence ao

conjunto “A”. As expressões descrevem a formulação das funções *pertence* e *não pertence*.

$$fA: U \rightarrow A \quad (4)$$

Tal que:

$$fA(x) = 1 \text{ se } x \in A \quad (5)$$

$$fA(x) = 0 \text{ se } x \notin A \quad (6)$$

Porém, ao contrário dos conjuntos *Crisp*, a fronteira que separa os conjuntos nebulosos não é expressa de maneira bem definida, pois nos conjuntos *fuzzy* explica que um elemento “x” não poderá ser classificado como “*pertence*” ou “*não pertence*” e sim a pertencer ao dois estados intermediários (ZADEH, 1965).

Um conjunto *fuzzy* “A” dentro de um universo “U” é determinado por uma função de pertinência “ $\mu_A(x): \rightarrow [0,1]$ ” que mapeia os elementos de “U” para o intervalo “[0,1]”, e em seguida representado por um conjunto de paredes ordenados descrito na expressão 7:

$$A = \{\mu_A(x)/x\} \quad x \in U \quad (7)$$

Assim, “ $\mu_A(x)$ ” expressa o quanto “x” é compatível com o conjunto “A”, logo, leva-se a conclusão que um elemento pode pertencer parcialmente a diversos conjuntos nebulosos dependendo do grau de pertinência.

4.2.3 Grau de Pertinência

Por definição consiste em indicadores de tendências atribuídas de forma subjetiva pelo usuário implementador, sendo tais valores caracterizados como dependentes do contexto no qual foram definidos.

Para se projetar um conjunto *Fuzzy*, é atribuído aos elementos desse conjunto um valor, onde tal valor varia entre “0” e “1” e é denominado de grau de

pertinência, no qual indica o quanto um determinado elemento pertence ou não a um dado conjunto.

4.2.4 Função de Pertinência

Caracteriza-se de uma curva que orienta como cada ponto no espaço de entrada é transposto para um valor associado ou grau de associação entre “0” até “1”. As funções de pertinência podem apresentar diversas formas, onde tais formas irão depender do contexto em que serão utilizadas, assim, elas podem apresentar características do tipo gaussianas, triangulares, trapezoidais, crescente, decrescente e também sigmóides. A Figura 7 representa os principais formatos de cada função descrita:

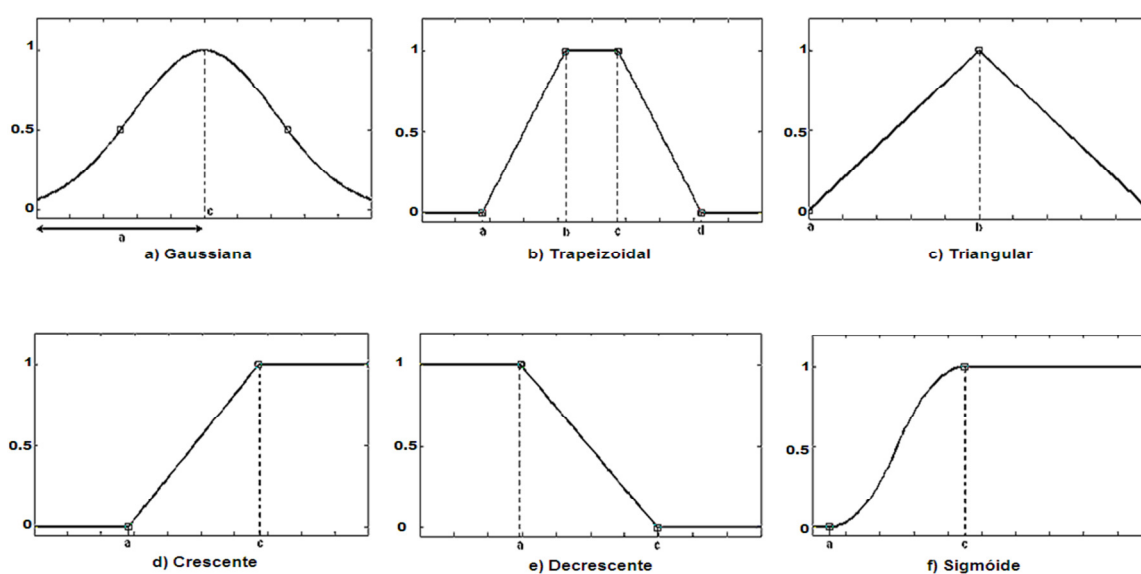


FIGURA 7 – Funções de Pertinência Utilizada pelo Sistema *Fuzzy*

Fonte: Dados da Pesquisa

4.2.5 Variáveis *Fuzzy* e Linguísticas

Já a variável linguística é caracterizada como uma sentença na forma de uma linguagem natural, isto é, tendo como exemplo: “Temperatura”, “Idade”, “Altura”. A variável *fuzzy* é a própria caracterização da variável linguística no qual está associado um conjunto *fuzzy*, isto é, como por exemplo: “Pequeno”, “Grande”, “Muito

Alto”, “Pouco Quente”. Assim, os valores de uma variável linguística podem ser sentenças construída a partir de variáveis *fuzzy*, dando como exemplo, a sentença linguística “Altura”, caracterizada pelos termos primários, “Muito Baixa”, “Baixa, “Média”, “Alta” e “Muito Alta”.

4.2.6 Regras de Inferências

São caracterizadas como as relações entre variáveis linguísticas, onde são descritas através de declarações condicionais nebulosas na estrutura do tipo “Se A é X, então B é Y”, onde “A” e “B” simbolizam as variáveis linguísticas e “X” e “Y” os conjuntos nebulosos (variáveis *fuzzy*). Sendo que o termo “Se A é X”, representa a parte da premissa e “então B é Y” é dita como a porção consequente da regra de inferência.

4.2.7 Sistema *Fuzzy*

É um sistema especialista baseado em regras *fuzzy* para a obtenção do resultado final. A composição do sistema *fuzzy* é composta através de módulos, onde a Figura 8 detalha a organização desses módulos na formação do sistema como um todo.

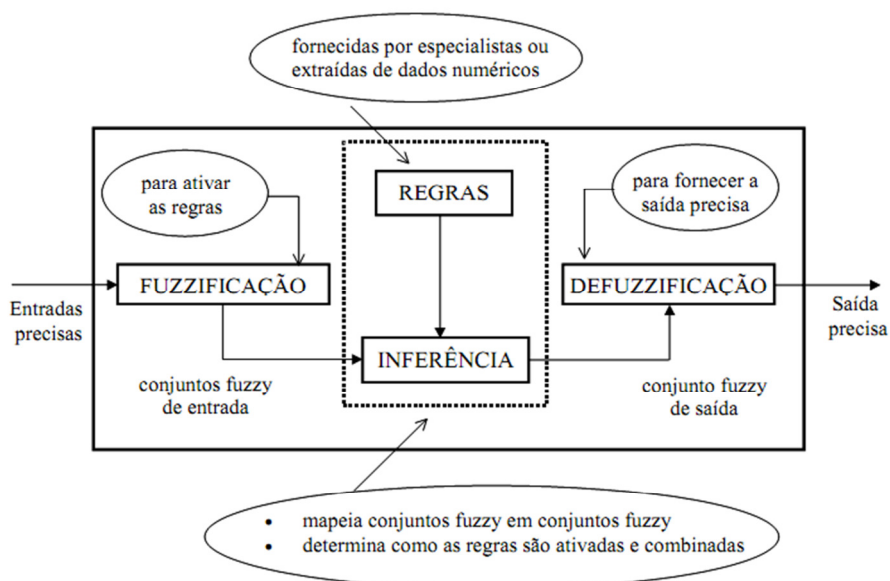


FIGURA 8 – Sistema de Inferência *Fuzzy*

Fonte: TANSCHKEIT, 1995

A descrição dos módulos do sistema de inferência com suas respectivas funcionalidades:

a) *Fuzzificação*: é definido como um processo de generalização, onde os valores de entradas precisas (entrada *Crisp*) serão traduzidos em valores *fuzzy*. O estágio de *fuzzificação* avalia o grau de pertinência da entrada numérica fornecida para então efetivar a conversão.

b) *Inferência*: é definido como o processo de conversão, pois é este módulo que tem a função de aplicar o mecanismo de interpretação do conjunto de regras para criar uma saída final, isso significa que, o módulo de inferência, a partir dos valores de entrada, determina como as regras serão ativadas.

c) *Defuzzificação*: é o processo de especificação, pois tem a função de traduzir a saída *fuzzy* para converter para uma saída do tipo *Crisp* ou precisa.

4.3 DESCRIÇÃO DO FUZZY-TFRC

O *Fuzzy-TFRC* (*Fuzzy TCP-Friendly Rate Control*) é um protocolo da camada de transporte que tem seu mecanismo de controle de congestionamento baseado na equação, onde o seu foco principal é de oferecer suporte para redes sem fio. Ele foi implementado sob a estrutura do DCCP (*DCCP/Fuzzy-TFRC*), e a sua arquitetura é

baseada no protocolo TFRC, ou seja, o *Fuzzy-TFRC* pode ser caracterizado como um TFRC com mecanismo de diferenciação de perdas para ambiente sem fio. O objetivo da construção desta proposta é ter a capacidade de distinguir perdas ocasionadas por congestionamento de perdas originadas por elevadas taxas de BER em redes do tipo WLAN.

As técnicas adotadas pelo *Fuzzy-TFRC* para distinguir os dois principais tipos de perdas se deu por meio da implantação de um mecanismo inteligente de tomada de decisão baseada em lógica *fuzzy*, e através da utilização do *Jitter Ratio*. O motivo do emprego da lógica nebulosa foi o de fazer com que o protocolo tenha a capacidade de tomar decisões racionais, isto é, seja capaz de analisar dados de caráter não precisos ou incertos, como no caso, os parâmetros das causas das perdas de pacotes nas redes sem fio. Já a utilidade do *Jitter Ratio* seria de servir de guia para o seu sistema *fuzzy* no processo de tomada de decisão.

4.3.1 Funcionamento Geral do Protocolo

O *Fuzzy-TFRC* funciona de forma semelhante ao TFRC, porém, exceto no momento do evento de uma perda. Quando um evento de perda é notificado por meio de um pacote de confirmação, o sistema *fuzzy* verifica se a perda ocorreu devido a um congestionamento ou não. Em caso positivo, ele avisará o protocolo para que o mesmo ative a sua equação de ajuste de taxa, do contrário, o sistema ordenará ao *Fuzzy-TFRC* que continue mantendo a sua taxa de transferência atual. A Figura 9 mostra um diagrama do funcionamento geral do algoritmo proposto. O funcionamento do sistema *fuzzy* depende da estratégia detalhada no subtópico 4.3.2.

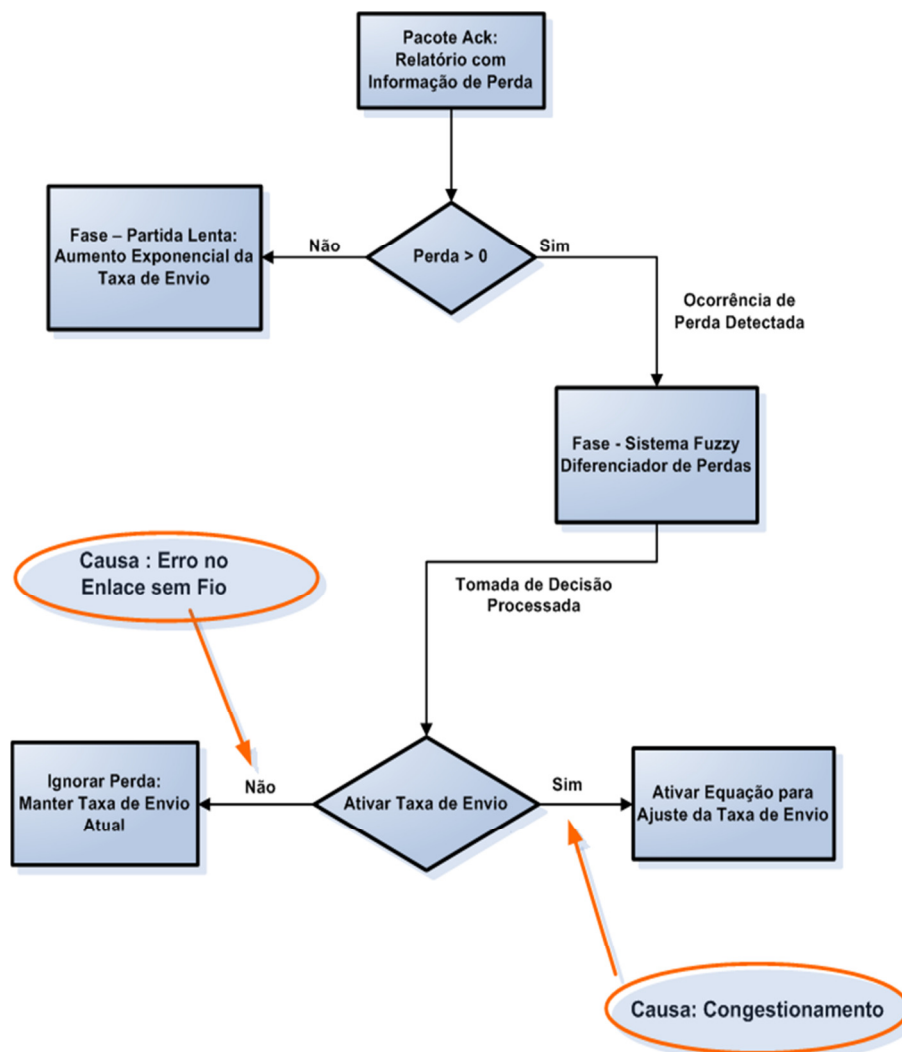


FIGURA 9 – Funcionamento Geral do *Fuzzy-TFRC* para Diferenciação de Perdas

Fonte: Dados da Pesquisa

4.3.2 Estratégia de Ação do *Fuzzy-TFRC*

A Figura 10 representa o comportamento do *Jitter Ratio* no protocolo TFRC em eventos de perdas provocados por congestionamento e, também, por elevada taxa de BER. Observa-se que no caso de congestionamento (apresentado nos intervalos entre 10.0 até 30.0, e 40.0 até 50.0) os valores de *Jitter Ratio* são maiores do que os do intervalo 30.0 e 40.0 onde ocorrem os erros no enlace sem fio. Isso significa que, no evento onde ocorre somente o congestionamento, os valores de *Jitter Ratio* tendem a aumentar em função do crescimento de pacotes descartados pelos roteadores. Situação diferente acontece quando há elevada taxa de BER (intervalo 30.0 até 40.0), onde o *Jitter Ratio* tende a ser menor por não provocar

congestionamento, mas apresenta elevados valores quanto ao comprimento de sua magnitude ou oscilação.

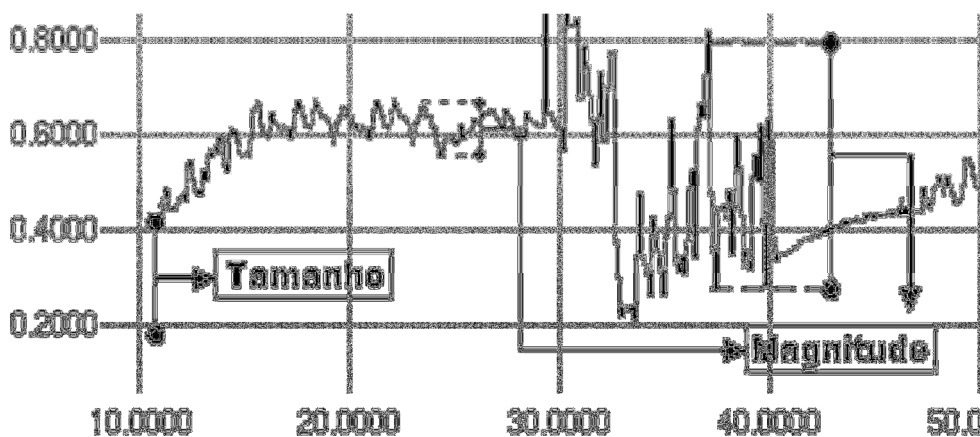


FIGURA 10 – Comportamento do *Jitter Ratio* em Presença de Congestionamento e BER

Fonte: Dados da Pesquisa

No intervalo 30.0 até 40.0, o motivo do aumento nas oscilações se deu porque o TFRC ativou sua equação da vazão desnecessariamente, pois considera qualquer evento de perda como um aumento no nível de tráfego na rede.

A estratégia de ação adotada pelo Fuzzy-TFRC para diferenciar as perdas utilizou medições quanto ao tamanho e magnitude do *Jitter Ratio* para encontrar os seus valores ideais (valores limites ou padrões), a fim de servirem de base de comparação com novos valores de tamanho e magnitude. O termo “tamanho” representa o próprio valor do *Jitter Ratio*, enquanto a “magnitude” é a amplitude, caracterizada pelo desvio padrão entre o *Jitter Ratio* atual e o anterior.

Para a obtenção do tamanho e magnitude ideais, a proposta coletará 30 amostras de valores de magnitude e de tamanho para efetivar o cálculo de suas médias. As médias das 30 amostras são programadas para serem atualizadas a cada novo valor amostral de *Jitter Ratio*.

4.3.3 Cálculo para Comparação dos Valores Tamanho e Magnitude

Quando o Fuzzy-TFRC emissor calcula um novo *Jitter Ratio* com base nos pacotes de confirmação por parte do receptor, o protocolo citado coleta este dado recente e efetua a comparação com o valor do tamanho padrão do *Jitter Ratio*, emitindo como resultado o valor do desvio (ou variância) entre ambos, a qual é

encaminhada para a variável de entrada no sistema *fuzzy* denominada de “Tamanho”. De maneira semelhante, do mesmo *Jitter Ratio* é extraído o seu valor de magnitude para ser comparado com o valor da magnitude padrão, e o resultado representa o valor do desvio padrão ou variância, logo, sendo encaminhado para outra entrada no sistema *fuzzy*, chamada de “Magnitude”.

4.3.4 Composição do Sistema *Fuzzy* Diferenciador de Perda

Neste subtópico serão descritos os componentes que integram o sistema *fuzzy*.

4.3.4.1 Entradas e Saídas

O sistema foi composto de duas variáveis de entrada (variáveis linguísticas) que são respectivamente o “Tamanho” e a “Magnitude”, e os seus conjuntos nebulosos foram “Pequeno”, “Médio” e “Grande”. A saída é representada pela variável linguística “Congestionamento” e seus conjuntos *fuzzy* foram “Sim” e “Não”. O Quadro 7 simplifica as entradas e saídas com os seus respectivos conjuntos difusos.

QUADRO 7 – Variáveis Linguísticas com seus respectivos conjuntos *fuzzy*

Variáveis Linguísticas		Conjuntos <i>Fuzzy</i>	Universo de Discurso
Entradas	Tamanho	Pequeno	[0:100]
		Médio	
		Grande	
	Magnitude	Pequeno	[0:100]
		Médio	
		Grande	
Saída	Congestionamento	Sim	[0:100]
		Não	

Fonte: Dados da Pesquisa

As Figuras 11 e 12 representam os conjuntos *fuzzy* criados. Para confecção das entradas com os seus conjuntos, foram utilizados *fuzzificadores* triangulares, pois simplificam os cálculos na máquina de inferência. No *defuzzificador* o método utilizado foi o centro ponderado. A saída do sistema está representada na Figura 12.

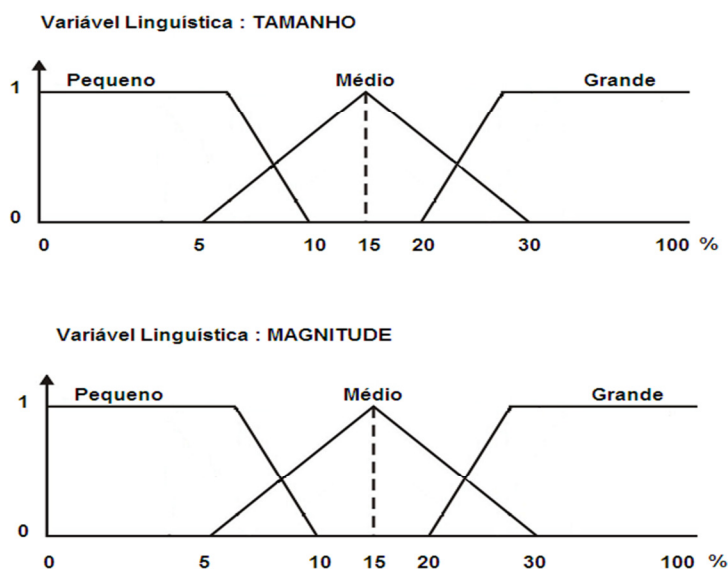


FIGURA 11 – Entradas *Fuzzy*

Fonte: Dados da Pesquisa

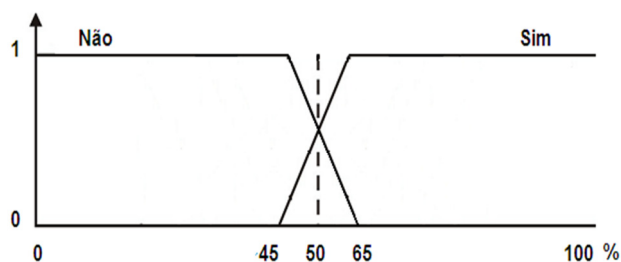


FIGURA 12 – Saída *Fuzzy*

Fonte: Dados da Pesquisa

Os valores limite das variáveis de entrada e saída foram definidos com base nas simulações (com 95% de intervalo de confiança) do protocolo TFRC, ou seja, simulou-se uma rede do tipo infraestruturada (Figura 13) oscilando do estado “sem congestionamento” para o estado “com congestionamento” com tráfego concorrente constante. Não se utilizou uma topologia do tipo *ad hoc* para que não houvesse

interferência nos resultados devido a fatores como a saturação da camada MAC (*Media Access Control*). Assim, os resultados das simulações serviram de embasamento na definição dos valores “0, 5, 10, 15, 20, 30 e 100%” para os valores de entrada, e “0, 45, 50, 66 e 100%” para os de saída. No conjunto de saída, o valor “50” foi definido como neutro, então, caso o resultado na saída seja igual a este número, considerar-se-á que há congestionamento.

4.3.4.2 Definição das Regras de Inferência

As regras de inferências adotadas são do tipo Mandani, pois tanto as entradas como saídas podem ser expressas por termos linguísticos. As regras de inferência foram definidas de acordo com especialistas. O Quadro 8 e 9 demonstra todas as regras do sistema como um todo.

QUADRO 8 – Regra de Inferência I

		TAMANHO		
		PEQUENO	MÉDIO	GRANDE
MAGNITUDE	PEQUENO	NÃO	NÃO	SIM
	MÉDIO	NÃO	NÃO	SIM
	GRANDE	NÃO	NÃO	SIM

Fonte: Dados da Pesquisa

QUADRO 9 - Regra de Inferência II

IDENTIFICAÇÃO	REGRAS
Regra 1	Se Tamanho Pequeno e Magnitude Pequena então Não Ativar Equação
Regra 2	Se Tamanho Pequeno e Magnitude Média então Não Ativar Equação
Regra 3	Se Tamanho Pequeno e Magnitude Grande então Não Ativar Equação
Regra 4	Se Tamanho Médio e Magnitude Pequeno então Não Ativar Equação
Regra 5	Se Tamanho Médio e Magnitude Média então Não Ativar Equação
Regra 6	Se Tamanho Médio e Magnitude Grande então Não Ativar Equação
Regra 7	Se Tamanho Grande e Magnitude Pequena então Ativar Equação
Regra 8	Se Tamanho Grande e Magnitude Média então Ativar Equação
Regra 9	Se Tamanho Grande e Magnitude Grande então Ativar Equação

Fonte: Dados da Pesquisa

As regras demonstradas no quadro acima sintetizam as tomadas de decisão do sistema. Uma situação pode ser descrita da seguinte maneira: caso o sistema *fuzzy* classifique as entradas como tamanho “grande” e magnitude “pequena”, significa que ele considerou que a causa da perda se deu por congestionamento, pois o desvio do tamanho “grande” simboliza que o *Jitter Ratio* atual apresenta tamanho fora dos padrões do sistema e, além disso, o tamanho da oscilação (magnitude) é menor que o normal imposto também pelo *fuzzy*. Em outra situação, caso ambas as entradas sejam classificadas como “grande”, o sistema *fuzzy* ativará a equação por que a sua a prioridade é o controle do congestionamento.

5 METODOLOGIA PARA A SIMULAÇÃO

O objetivo deste capítulo é o de descrever os procedimentos envolvidos para avaliar o desempenho do protocolo *Fuzzy-TFRC* em redes sem fio. Essa metodologia consiste na descrição dos procedimentos de simulações e análise estatística dos dados, onde tal análise serve de base para avaliar o desempenho da proposta desenvolvida nesta dissertação.

5.1. PROCESSO DE SIMULAÇÃO

O objetivo deste trabalho de dissertação consiste no desenvolvimento de um novo protocolo de controle de congestionamento, capaz de diferenciar perdas de pacotes, provenientes de congestionamento de perdas ocasionadas por erros no enlace sem fio, através de um mecanismo inteligente de tomada de decisão denominado de lógica *fuzzy*. Para comprovar a validade da técnica de diferenciação, a metodologia empregada para validação foi o procedimento de simulação.

A avaliação da proposta por meio de simulações de redes de computadores é de grande importância, pois reside no fato de que fazer uma avaliação de desempenho através de experimentos reais faz com que tal realização seja de elevado custo financeiro, e também de grande complexidade (dimensões da rede, heterogeneidade, etc.) em termos de montagem.

Então para avaliação da eficácia e do desempenho do protocolo *Fuzzy-TFRC*, foram também utilizadas como referência de desempenho, os protocolos TFRC, TFRC-Jr, AJR-TFRC e TCP *New Reno*. A escolha do TFRC deveu-se ao fato de se verificar a eficácia do *Fuzzy-TFRC* perante o TFRC quando empregados em redes sem fio; como o TFRC-Jr e AJR-TFRC é um protocolo também baseado no TFRC e que apresenta suporte para redes sem fio, então a finalidade de sua utilização nos teste, foi de se fazer a comparação dos desempenhos de ambos os protocolos, com o intuito de medir seus graus de sensibilidade na diferenciação das perdas; já a escolha do *TCP New Reno* deveu-se ao fato de ser um protocolo bastante utilizado na internet e principalmente na análise dos níveis de justiça entre ambos os protocolos quando concorrem por uma mesma largura de banda.

5.2 FERRAMENTA PARA A SIMULAÇÃO

Para a realização das simulações, foi utilizada a ferramenta denominada *Network Simulator* (NS-2, 2009), que é um simulador de redes de computadores que possui uma vasta biblioteca de objetos de tecnologias de redes e protocolos, permitindo ao pesquisador simular várias situações encontradas em redes reais. A versão do simulador utilizada nesse trabalho é a 2.31, que está inclusa no pacote de instalação *allinone-2.31*.

5.3 TOPOLOGIAS PARA AS SIMULAÇÕES

Foram criadas duas redes, uma infraestruturada e outra *ad-hoc* que representam as topologias das redes sem fio.

A topologia apresentada na Figura 13 simula uma rede sem fio do tipo infraestruturada, sendo composta de quatro servidores de aplicações interligados via enlace cabeado em um roteador, que por sua vez, também se conecta a uma estação base, e essa estação faz cobertura para um cliente móvel. Em relação ao sentido da transmissão, os servidores serão classificados como remetentes e o cliente como destinatário.

Já na topologia *ad hoc*, representada pela Figura 14, seis computadores foram posicionados na formação em linha, onde esses nós foram espaçados igualmente e posicionados de maneira que a transmissão entre eles seja ocorrida somente por múltiplos saltos, isto é, os nós móveis se comportaram como roteadores, permitindo que eles se comuniquem, mesmo que a distância entre a origem e destino seja maior do que seus respectivos raios de cobertura. Quanto ao sentido da transmissão, a estação servidora (remetente) está localizada na extremidade da esquerda e a estação cliente (destinatária) está posicionada no final da ponta da topologia à direita.

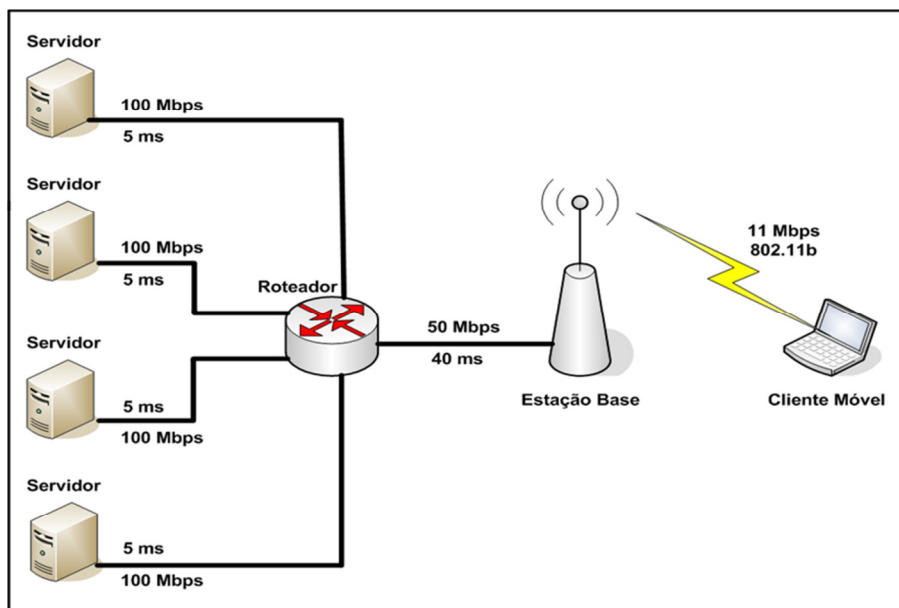


FIGURA 13 – Topologia da Rede Sem Fio Infraestruturada que Será Utilizada nas Simulações

Fonte: Dado da Pesquisa

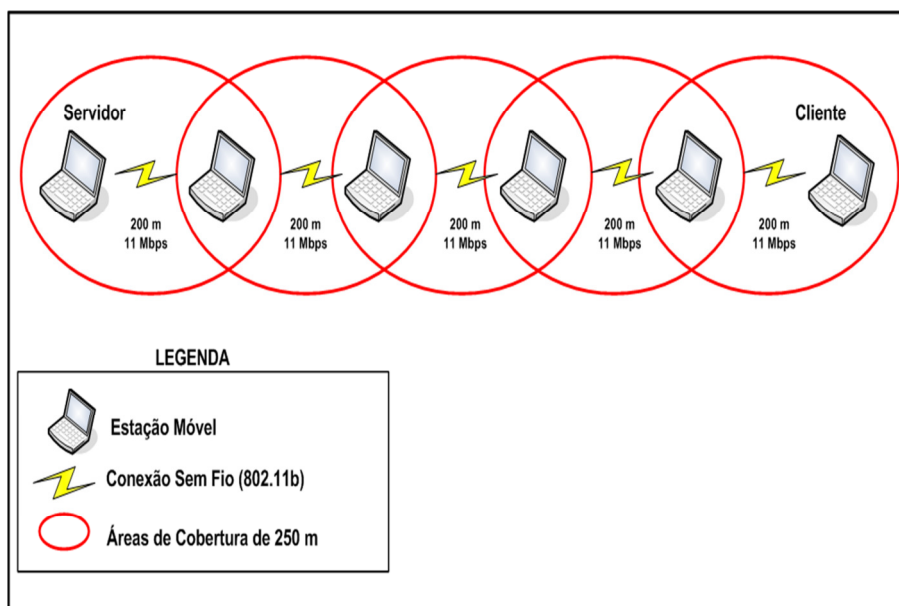


FIGURA 14 – Topologia de Rede Sem Fio Ad hoc com Conexão via Múltiplos Saltos entre Servidor e Cliente Móvel

Fonte: Dados da Pesquisa

5.4 PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DAS TOPOLOGIAS

Para modelar de forma geral as topologias sem fio, de forma a apresentarem características bem próximas aos ambientes reais, os seguintes parâmetros foram levados em consideração: nós, enlace, agente, tipo de aplicação, canal, modelo de propagação de rádio, tipo de interface de rede, a camada MAC, o tamanho da fila de espera, o modelo de antena, etc. A definição dos parâmetros estão dispostos no Quadro 10.

QUADRO 10 – Parâmetros Gerais tanto para Infraestruturada quanto para Ad Hoc

Parâmetros Gerais de Configuração	Valores Definidos
Tipo de Canal	<i>Wireless Channel</i>
Modelo de Propagação	<i>Two Ray Ground</i>
Modelo de Antena	<i>Omni Antenna</i>
Camada de Ligação	LL
Camada de Acesso ao Meio	802.11b
Interface de Rede	<i>Wireless Phy</i>
Interface da Fila	<i>DropTail</i>
Comprimento da Fila de Pacotes	50
Largura da Banda	11 Mbps

Fonte: Dados da Pesquisa

Em se tratando da Topologia Ad hoc, os seus parâmetros específicos foram: a adoção da política de controle de roteamento ser baseado no protocolo AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*); as dimensões topográficas definidas em torno de 1000 x 1000m. Já na Rede Infraestruturada, o protocolo de roteamento adotado foi o DSDV (*Destination-Sequenced Distance Vector*) e as dimensões topográficas foram 640 x 640 m.

5.4.1 Modelo de Erro para as Topologias

Para simular a presença de perdas ocasionadas por erros no enlace sem fio, foi utilizado um modelo de erro. O tipo de distribuição de erro adotado foi o modelo Gilbert-Elliot para análise da perda de pacotes na rede. O motivo da escolha desse modelo foi devido os ambientes sem fio apresentarem perda de pacotes por não congestionamento originados em grande probabilidade por erros em rajada, sendo que o modelo de Gilbert-Elliot simula semelhante comportamento.

5.4.2 Configuração do Tráfego Principal

O tráfego principal é onde foi empregada grande parte das observações para avaliação de desempenho via simulações.

Para a análise da sensibilidade (seção 6.1) e do desempenho (seção 6.2), o Fuzzy-TFRC, TFRC, TFRC-Jr e AJR-TFRC utilizaram um tráfego de vídeo como principal. Já para a verificação do nível de justiça (seção 6.3), além dos protocolos citados, foi incluído o TCP New Reno com tráfego do tipo FTP (*File Transfer Protocol*) como principal. O tamanho do pacote em 1000 *bytes* foi definido para o tráfego do tipo FTP.

QUADRO 11 – Parâmetros de Configuração do Tráfego de Vídeo

Configuração do Tráfego de Vídeo	Valores Utilizados
Nome do Vídeo	<i>Highway</i>
Resolução	QCIF
Tipo de Vídeo	MPEG Vídeo <i>Stream</i>
Total de Frames	2000
Frames I	223
Frames P	445
Frames B	1332
Tamanho Máximo do Pacote a ser Transmitidos	1000

5.4.3 Tráfego de Fundo

O tráfego de fundo teve a finalidade de reproduzir fluxos concorrentes dentro da rede e também de criar diferentes níveis de congestionamento. Então o gerador de tráfego de fundo escolhido foi do tipo exponencial, pois sua geração de conteúdo segue um intervalo de chegadas entre pacotes dado por uma distribuição exponencial seguindo um processo de *markov*. No simulador NS-2 (*Network Simulator*), o gerador de tráfego exponencial escolhido como tráfego de fundo foi o *Application/Traffic/Exponential*, onde esse tipo de aplicação gera um fluxo de pacotes do tipo ligado e desligado, ou seja, seus parâmetros de entrada são a taxa de tráfego fixa durante uma rajada, o tempo médio da rajada e o tempo médio de ociosidade (sem transmissão de pacotes). A finalidade da utilização do tráfego utilização nas simulações foi para provocar diferentes níveis de congestionamento por meio da variação do tempo de transmissão dos pacotes via tempo médio de rajada e também de ociosidade. O Quadro 12 descreve os parâmetros utilizados nos testes.

QUADRO 12 – Parâmetros utilizados pelo Tráfego Exponencial

Parâmetros do Tráfego Exponencial	Valores Utilizados
Tamanho do Pacotes	400 bytes
<i>Burst Time</i>	0,5
<i>Idle Time</i>	0.5
Taxa de Envio	100 - 1000 Kbps

Fonte: Dados da Pesquisa

5.5 PROCEDIMENTOS PARA A EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Os resultados do desempenho do Fuzzy-TFRC são baseados nas avaliações de QoS (Qualidade de Serviço), em níveis de sensibilidade, desempenho e justiça heterogênea, e métricas de QoE. Cada simulação ou experimento corresponde a uma rodada sendo configurada para terminar em 100 segundos. Assim, para a

avaliação da proposta, foram realizadas 40 experimentos para a obtenção de resultados confiáveis, e com um intervalo de 95% de confiança.

5.6 COLETA DE DADOS

Nesta fase, os resultados de todas as simulações foram coletados para análise, isto é, o simulador Ns-2 foi configurado para armazenar os resultados das simulações em registros denominados de *traces*. Os arquivos de *traces* contêm todas as informações necessárias para analisar o desempenho do *Fuzzy-TFRC*, então, o desempenho do protocolo proposto foi avaliado em função de métricas de desempenho, onde tais métodos de avaliação filtraram os dados específicos retirados dos arquivos de registros para a coleta de específicos resultados. Porém, para maior confiabilidade dos dados filtrados pelas métricas de desempenho, foram utilizados cálculos estatísticos para a obtenção dos intervalos de confiança.

Os procedimentos para a busca de valores confiáveis foram por meios da coleta de amostras, onde tal amostragem foi calculada a média, desvio padrão e o próprio intervalo de confiança para a obtenção da margem de confiança localizada pela a obtenção de dois valores, um mínimo e outro máximo. Sendo que, procurou-se alcançar através de repetições dos experimentos (aumento do número de amostras gradativo), uma margem de diferença entre esses dois valores (máximo e mínimo) entre 2 a 5% de diferença. O quadro 13 abaixo descreve os parâmetros utilizados para o cálculo do intervalo de confiança:

QUADRO 13 – Parâmetros Utilizados para o Cálculo do Intervalo de Confiança

Parâmetros para o Intervalo de Confiança	Valores Utilizados
Intervalo de Confiança	95%
Número Médio de Repetições de Simulação	20-40 repetições
Diferença entre Valores Máximo e Mínimo	2-5%

Fonte: Dados da Pesquisa

5.7 MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para avaliação de desempenho foi utilizado duas classes de métricas, no caso, as métricas de Qualidade de Serviço (QoS) e de Qualidade de Experiência (QoE).

5.7.1 Métricas para a Avaliação da Qualidade de Serviço

Em termos de definição, a Qualidade de Serviço é a própria organização do tráfego na rede, onde tal organização é permitida por meio de prioridades e limites de forma a melhorar a percepção do usuário quando utiliza um determinado serviço nessa rede. Assim, as métricas de desempenho de QoS foram utilizadas para avaliar o comportamento do *Fuzzy-TFRC* e dos outros protocolos no que diz respeito as suas performances e utilizações quanto a organização do tráfego nas redes simuladas.

a) Vazão: é a medição da taxa de informação ou transferência enviada pelo transmissor até o receptor por unidade de função do tempo, ou seja, ou seja, é o parâmetro que indica a taxa de transmissão efetiva dos dados. Pode-se dizer que a vazão é a banda de rede ocupada por uma aplicação, pois no cálculo da vazão apenas entram os pacotes isentos de erro.

b) Taxa de Erro: são os números de transmissões com erro em relação ao total de transmissões realizadas. Sendo a unidade de medida utilizada foi a porcentagem.

c) Índice de Justiça: a métrica de Índice de Justiça (*Fairness Index*) (JAIN, 1991) mede o grau de justiça entre os fluxos que competem na rede. O índice é descrito pela formula:

$$f_i = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n * \sum_{i=1}^n (x_i)^2} \quad (8)$$

Onde, x_i é o valor médio das vazões e n é o numero de fluxos. Com $1/n \leq f_i \leq 1$. Este índice classifica em uma escala entre '1/n' e '1' o nível de justiça que existe

entre dois fluxos, sendo '1/n' para o menos justo e '1' para uma distribuição totalmente equilibrada, com todos os fluxos com a mesma vazão na rede.

5.7.2 Métricas para a Avaliação da Qualidade de Experiência

Refere-se à medição do grau de percepção do usuário sobre a qualidade de serviço oferecida pela rede, ou seja, através dos sentimentos humanos, um usuário poderá avaliar se a qualidade de serviço observada seja classificada como boa, excelente, pobre, etc.

A finalidade da utilização destas métricas deve-se ao fato que tradicionalmente, o desempenho das redes é comumente avaliado através de métricas de Qualidade de Serviço (QoS). Contudo, as métricas de QoS habitualmente utilizadas (por exemplo, vazão, perda de pacotes, atraso, *jitter*, probabilidade de bloqueio e etc.) não informam como o serviço é percebido pelos usuários. A Qualidade de Experiência (QoE), no entanto, é usada para quantificar a percepção do usuário sobre a qualidade de um serviço em particular ou da rede (SOLDANI; et al., 2006).

As métricas de QoE podem ser objetivas ou subjetivas. As métricas QoE objetivas podem ser classificadas com base na quantidade de informações de referência disponíveis durante o processo de avaliação da qualidade dos serviços multimídia, podendo ser de Referência Completa (*Full Reference - FR*), de Referência Reduzida (*Reduced Reference - RR*) ou Sem Referência (*No Reference - NR*) (WINKLER, 2005). As métricas de Referência Completa realizam uma comparação direta entre o conteúdo de mídia recebido e todo o arquivo de mídia original, desse modo, pode-se dizer que as métricas de fidelidade tais como o PSNR (WINKLER, 2005) e o SSIM (WANG; et al., 2004) pertencem a esta classe. Assim as principais métricas que foram trabalhadas foram:

a) PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*): a métrica mais tradicional de QoE é o PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*), que estima a qualidade do vídeo em decibéis (dB), comparando o vídeo original com o vídeo recebido pelo usuário. Esta métrica considera o aspecto de luminosidade.

b) SSIM (*Structural Similarity Index*): outra métrica importante é o SSIM (*Structural Similarity Index*). Diferentemente do PSNR, que apenas analisa a taxa de erro do vídeo recebido em relação ao vídeo original, o SSIM avalia o vídeo recebido,

levando em consideração as características do SVH (Sistema Visual Humano). O SSIM analisa a similaridade de cores, luminosidade e estrutura. Essa métrica surgiu pelo fato do SVH ser altamente eficiente em extrair informações visuais das imagens/vídeos e não em extrair taxa de erro.

O valor de SSIM é expresso como um valor decimal entre 0 e 1. Quanto mais próximo do 0, pior é a qualidade do vídeo, e quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade do vídeo. No caso em que o valor é igual a 1, o vídeo recebido pelo usuário foi reproduzido com 100% de fidelidade ao vídeo original.

c) MOS (*Mean Opinion Score*): é a medida de qualidade multimídia subjetiva mais amplamente utilizada. O MOS é obtido através de entrevistas em que as pessoas classificam a qualidade do conteúdo em uma escala de cinco pontos: *Excellent, Good, Fair, Poor* e *Bad* (Excelente, Bom, Regular, Ruim e Péssimo), sempre em condições controladas.

QUADRO 14 – Classificação do Teste Subjetivo MOS em Valores de PSNR.

MOS	PSNR (dB)
Excelente	>37
Bom	31-37
Regular	31-25
Péssimo	25-20
Pobre	<21

Fonte: LAMBRECHT, 1996

6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão descritos os detalhes referentes aos resultados coletados após simulação para avaliar o desempenho do protocolo *Fuzzy-TFRC* em ambiente sem fio. Então, para isso, foi necessária a efetuação de uma análise estatística diretamente nos resultados coletados, através da utilização de métricas de desempenho, como as métricas para verificação da Qualidade de Serviço da rede e também de experiência vivida pelo usuário. Os resultados irão ser apresentados através de gráficos, tabelas e ilustrações, com a finalidade de uma melhor discussão, análise e explanação das informações coletadas.

6.1 AVALIAÇÃO DO GRAU DE SENSIBILIDADE

O objetivo desta avaliação foi verificar o nível de sensibilidade do *Fuzzy-TFRC* quanto à diferenciação da perda. Para isso, a proposta foi submetida a um cenário de topologia infraestruturada, com ausência de situações de congestionamento. Nessa avaliação não foi utilizado o cenário *ad-hoc* devido a sua conexão via múltiplos saltos influenciar nos resultados.

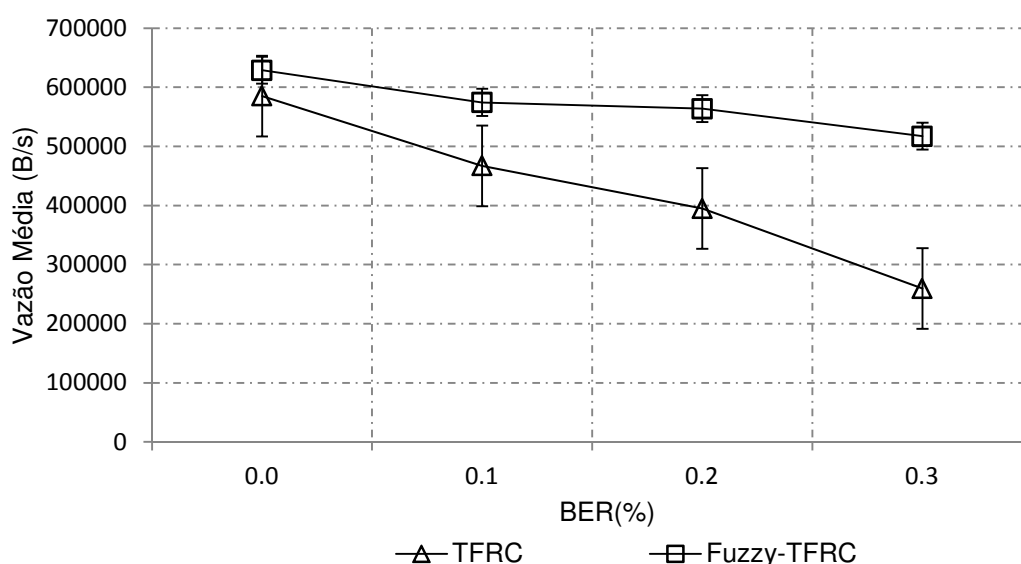


GRÁFICO 1 – Nível de sensibilidade quanto à detecção de erros no enlace sem fio

Fonte: Dados da Pesquisa

No Gráfico 1, à medida que o valor da taxa de BER aumenta, observa-se que a taxa de envio do TFRC diminui consideravelmente mesmo que a rede não apresente congestionamento. O motivo dessa queda de rendimento foi devido o TFRC não conseguir distinguir essas perdas, e isso fez com que ele ative sua equação da vazão desnecessariamente. No caso do Fuzzy-TFRC, embora reduza a sua taxa, o seu mecanismo de diferenciação impede que o seu desempenho reduza em demasia. Então, nota-se que o Fuzzy-TFRC alcança um desempenho aproximado de 50% superior ao TFRC para o caso com maior valor de probabilidade de perda (30%).

6.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Foi avaliado o desempenho do Fuzzy-TFRC em relação aos protocolos TFRC, AJR-TFRC e TFRC-JR, sendo que o motivo da utilização destes dois últimos foi em virtude dos mesmos também serem baseados no *Jitter Ratio*. Desse modo, para criar um ambiente mais complexo e dificultar a capacidade de identificação e diferenciação realizada pelos protocolos, os cenários ad hoc e infraestruturado foram configurados para gerarem tanto eventos de congestionamento e quanto de BER. Para o cenário infraestruturado, o tráfego de fundo foi configurado para aumentar a sua taxa a cada intervalo de tempo definido no subtópico 5.4.3 do capítulo 5. Por ser desenvolvido para ambientes ad hoc, o AJR-TFRC não foi utilizado.

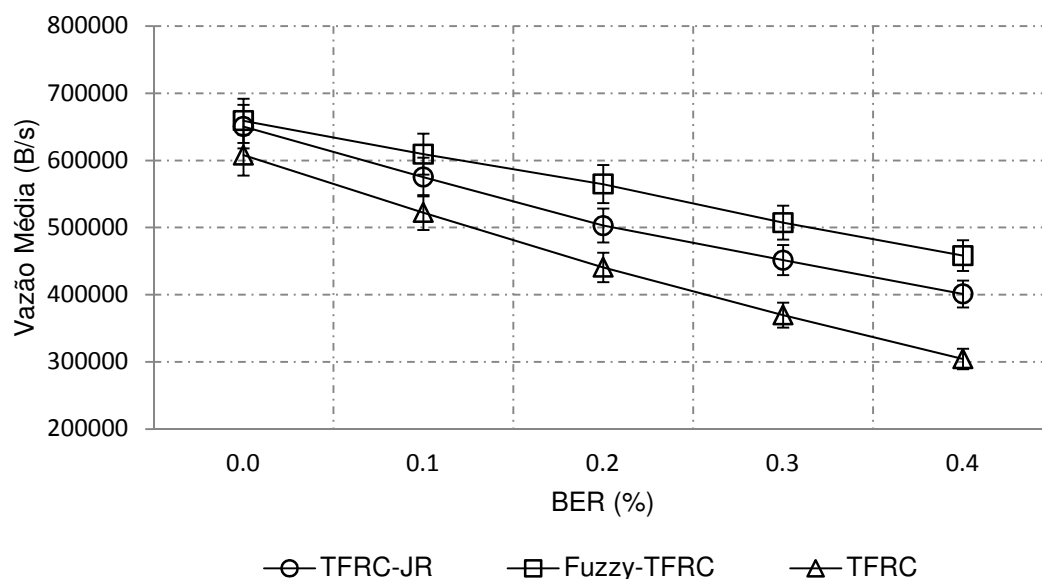


GRÁFICO 2 – Desempenho em Rede Infraestruturada

Fonte: Dados da Pesquisa

Analisando a GRÁFICO 2, pode-se notar que ambos os protocolos perdem o seu rendimento quando se eleva a taxa de BER. Isso significa que tanto o TFRC-JR quanto o Fuzzy-TFRC não detectam as perdas por erro em sua totalidade, porém, nas taxas de 10, 20, 30 e 40% de perdas, os ganhos obtidos pela proposta Fuzzy-TFRC em relação ao TFRC-JR foram respectivamente, 5%, 10%, 12% e 12%, e em relação ao TFRC foram 16, 25, 25 e 34% aproximadamente.

O motivo do protocolo Fuzzy-TFRC apresentar um melhor desempenho perante o TFRC-JR no cenário infraestruturado, foi devido o mecanismo de alisamento exponencial do TFRC-JR considerar somente o valor do Jitter Ratio como parâmetro para a diferenciação da perda, ao passo que o mecanismo adotado pelo Fuzzy-TFRC considera os parâmetros do tamanho e também da magnitude do Jitter Ratio, fazendo com que o seu sistema fuzzy tenha uma maior acurácia em relação ao alisamento exponencial simples da referida proposta da literatura.

O segundo experimento para análise do desempenho se deu por meio da utilização do cenário ad hoc, onde foi configurada uma taxa de *bit error rate* fixada em 20% de probabilidade de perda, tráfego de fundo ajustado em 400 Kbps e comunicação em cinco saltos entre o emissor e receptor. O protocolo TFRC-JR não fez parte do experimento por não ser voltado para esse tipo de rede.

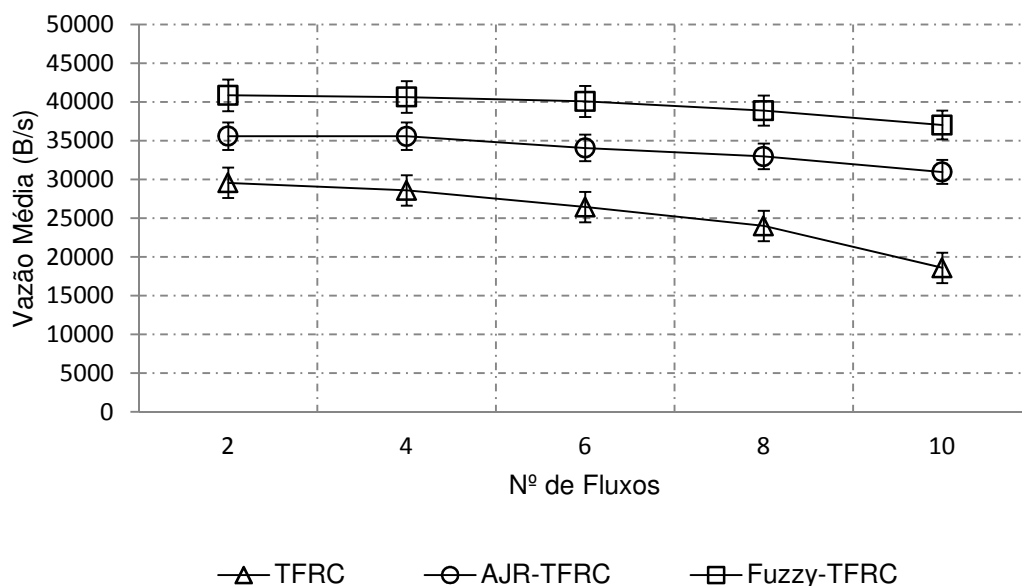


GRÁFICO 3 – Rede Ad hoc com 5 Saltos

Fonte: Dados da Pesquisa

No Gráfico 3, o desempenho dos protocolos no cenário ad hoc foi bem inferior ao desempenhado na rede infraestruturada, em virtude do elevado nível de saturação da camada MAC, provocada pela comunicação via múltiplos salto. Isto é, quanto maior o número de saltos, menor será a taxa de envio produzida pelo emissor. Diante disso, os protocolos avaliados não possuem suporte para estimar o nível de saturação da camada MAC, portanto, a finalidade de se utilizar esse cenário foi de observar os seus desempenhos. Assim, o Fuzzy-TFRC alcançou em relação ao AJR-TFRC um ganho de 12% (2 a 6 fluxos concorrentes), 15% (8 fluxos) e 17% com 10 fluxos de fundo. Em relação ao TFRC, o Fuzzy-TFRC obteve melhoria de 25% (de 2 a 4 fluxos), 37% (de 6 a 8 fluxos) e 45% para 10 fluxos.

Tanto o AJR-TFRC quanto o Fuzzy-TFRC possuem mecanismos de diferenciação de perda que funcionam de forma adaptativa, isto é, buscando se adaptarem as condições da rede por intermédio da métrica de Jitter Ratio. O mecanismo de alisamento exponencial adaptativo do AJR-TFRC considera somente os valores medidos de Jitter Ratio, não considerando mais de um parâmetro, e isso faz com que ele além de apresentar uma menor acurácia na diferenciação da perda, também desenvolva uma inferior taxa de envio quando comparado ao Fuzzy-TFRC nos experimentos, logo, pode-se dizer que o Fuzzy-TFRC é menos influenciado em

relação ao problema de saturação da camada MAC do que o AJR-TFRC em ambiente *ad hoc* com múltiplos saltos.

6.3 ANÁLISES DO NÍVEL DE JUSTIÇA

Foi avaliado se o Fuzzy-TFRC compartilha banda passante de forma justa com o protocolo TCP e verificando se o protocolo proposto é amigável ao TCP. Assim, neste trabalho foi utilizada a métrica de *fairness index* que mede o nível de justiça entre os fluxos que compartilham a mesma largura de banda da rede. Então, se simulou o comportamento de quatro fluxos TCP compartilhando a banda com cada um dos protocolos analisados separadamente.

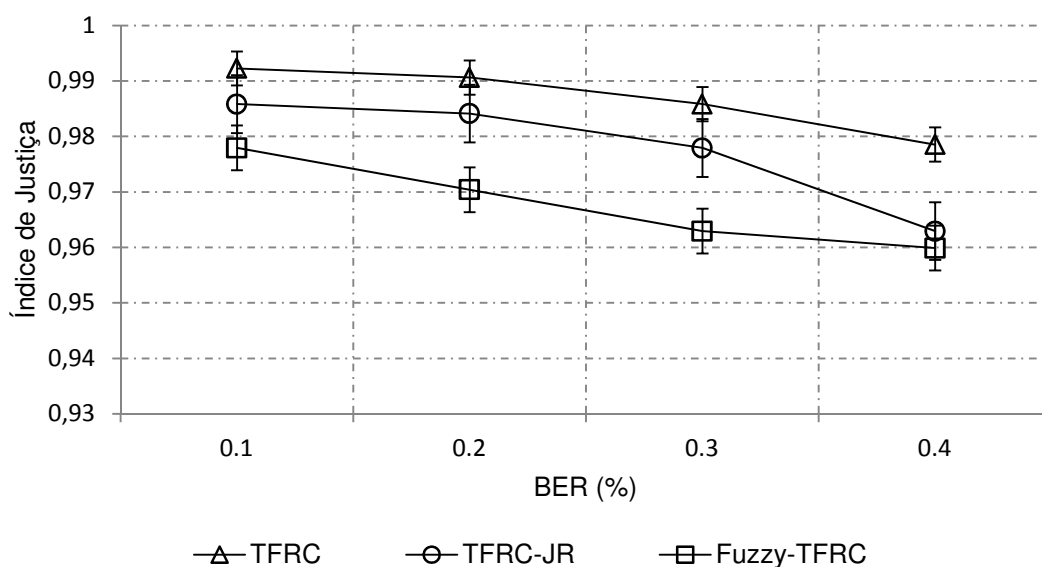


GRÁFICO 4 – Justiça em Rede Infraestruturada

Fonte: Dados da Pesquisa

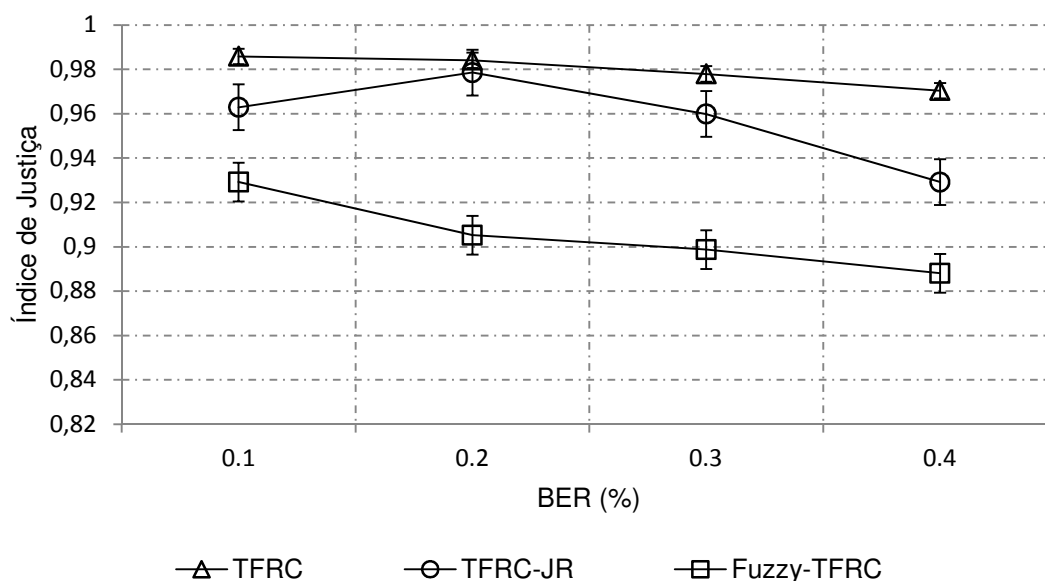


GRÁFICO 5 – Justiça em Rede Ad Hoc

Fonte: Dados da Pesquisa

Nos Gráficos 4 e 5, o Fuzzy-TFRC alcança um desempenho inferior ao TFRC, AJR-TFRC e TFRC-JR, e em ambos os gráficos, o TFRC apresentou um índice de justiça maior do que as outras propostas, pois segundo Li et al. (2006), o motivo dos protocolos com suporte a diferenciação de perdas possuírem menor equidade, foi devido o TCP New Reno não ter suporte para redes sem fio, ou seja, esse suporte faz com essas propostas sejam mais agressivas na competição por banda passante. Porém o Fuzzy-TFRC alcançou um nível de justiça aceitável em torno de 0,96 no pior caso (40% de perda) em rede infraestruturada e 0,88 em taxa de 40% de perda em cenário *ad hoc*.

6.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA

Para avaliar a qualidade de experiência (QoE) no protocolo *Fuzzy-TFRC*, foi utilizada uma ferramenta denominada de Evalvid (2009), que serve como um complemento ao *Network Simulator* para a realização de transmissão de vídeo nas simulações.

As métricas para avaliar a QoE foram o PSNR e o SSIM, e a configuração do cenário infraestruturado e ad hoc foi definida de maneira igual ao do cenário de desempenho (tópico 6.2). A escolha da métrica de PSNR deve-se ao fato de que é

um tipo de medição tida como tradicional para avaliação de QoE, sendo que o PSNR teve a função de estimar, através da taxa de erro, o nível de qualidade de vídeo (unidades de decibéis) de forma a comparar o vídeo original com o recebido pelo usuário. Já a métrica de SSIM tem como intenção fazer a análise segundo as características do sistema visual humano ou SVH, ou seja, por meio da estrutura, luminosidade e similaridade de cores, sendo que o valor de unidade de medida do SSIM é expresso em valores decimais entre 0 até 1, onde 100% de qualidade de vídeo tem como resultado o valor 1.

Para avaliação do protocolo *Fuzzy-TFRC* foram simulados os níveis de qualidade de experiência quando as taxas de erro alcançam 10% e 20% de perda no cenário infraestruturado. As Tabelas 1 e 2 detalham os resultados.

TABELA 1 – Cenário Infraestruturado com 10 % de Perda por BER

Métricas de QoE	<i>Fuzzy-TFRC</i>	TFRC-JR	TFRC
PSNR	33,16	30,23	28,53
SSIM	0,92	0,88	0,86
MOS	Bom	Aceitável	Aceitável

Fonte: Dados da Pesquisa

TABELA 2 – Cenário Infraestruturado com 20 % de Perda por BER

Métricas de QoE	<i>Fuzzy-TFRC</i>	TFRC-JR	TFRC
PSNR	31,86	29,76	26,45
SSIM	0,90	0,84	0,75
MOS	Bom	Aceitável	Aceitável

Fonte: Dados da Pesquisa

Os valores das Tabelas 1 e 2 descrevem o comportamento da qualidade de vídeo quando estes são submetidos às taxas de perda de 10 e 20%. Percebe-se que

o aumento da taxa influencia na qualidade de vídeo, e o protocolo TFRC foi o que obteve o menor rendimento. O Fuzzy-TFRC foi o protocolo que alcançou melhor desempenho, conseguindo manter-se com qualidade classificada como boa, segundo os níveis MOS e obteve em termos percentuais um rendimento de 8% em relação ao TFRC-JR, no cenário com 20% de perda. As Figuras 15 e 16 ilustram os resultados da qualidade visual das imagens processadas após simulação.



FIGURA 15 – Qualidade de Vídeo em Cenário Infraestruturado com 10 % de Perda

Fonte: Dados da Pesquisa



FIGURA 16 – Qualidade de Vídeo em Cenário Infraestruturado com 20 % de Perda

Fonte: Dados da Pesquisa

No cenário *ad-hoc* verificou-se o impacto das soluções levando em consideração a percepção do usuário quando a comunicação é realizada com 2 e 5 saltos, e a rede apresentando uma taxa de BER de 20% de perda.

TABELA 3 – Cenário Ad hoc com 2 Saltos e 20% de Perda por BER

Métricas de QoE	<i>Fuzzy-TFRC</i>	<i>AJR-TFRC</i>	TFRC
PSNR	32,23	32,06	29,96
SSIM	0,91	0,91	0,87
MOS	Bom	Bom	Aceitável

Fonte: Dados da Pesquisa

TABELA 4 – Cenário Ad hoc com 5 Saltos e 20% de Perda por BER

Métricas de QoE	Fuzzy-TFRC	AJR-TFRC	TFRC
PSNR	30,04	28,10	24,49
SSIM	0,88	0,80	0,63
MOS	Aceitável	Aceitável	Pobre

Fonte: Dados da Pesquisa

Nesses cenários, os efeitos da saturação da camada MAC e mais a taxa de perda, influenciaram no desempenho da qualidade de vídeo, pois tanto o Fuzzy-TFRC quanto o AJR-TFRC conseguem se manter com uma boa qualidade de vídeo via 2 saltos (Tabela 3), e com 5 saltos (Tabela 4), o MOS cai para um nível aceitável. Porém, observando a Figura 18, o Fuzzy-TFRC alcançou uma melhor qualidade de vídeo em relação ao AJR-TFRC, ou seja, essa melhor qualidade visual da imagem poder ser justificada com base na métrica de SSIM é um modelo de medição superior ao PSNR, pois leva em consideração parâmetros característicos do sistema visual humano como a similaridade de cores, luminosidade e estrutura, assim, em termos percentuais, o protocolo Fuzzy-TFRC obteve um rendimento 10% superior em relação à qualidade de vídeo proposta pelo AJR-TFRC. As Figuras 17 e 18 ilustram os resultados da qualidade visual das imagens processadas após simulação.



FIGURA 17 – Qualidade de Vídeo em Cenário Ad Hoc com 20 % de Perda e 2 Saltos

Fonte: Dados da Pesquisa



FIGURA 18 – Qualidade de Vídeo em Cenário Ad Hoc com 20 % de Perda e 5 Saltos

Fonte: Dados da Pesquisa

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evolução das redes sem fio e a demanda por novos serviços multimídia está criando uma nova era na Internet, onde mecanismos de controle de congestão são necessários para aperfeiçoar a utilização dos recursos, prover justiça e aumentar a satisfação dos usuários. Neste contexto, este artigo apresentou a solução Fuzzy-TFRC que utiliza as medições de *Jitter Ratio* e lógica *fuzzy* para minimizar os efeitos das elevadas BER.

Os resultados da avaliação do Fuzzy-TFRC comprovam a eficiência e eficácia da proposta em relação ao estado-da-arte. O Fuzzy-TFRC detecta erros randômicos quando submetido em ambientes de elevada taxa de bit de erro (BER) e congestionamento, a proposta obteve um ganho em relação ao TFRC de 34% no cenário infraestruturado (em 40% de perda) e 45% na topologia ad hoc com 10 fluxos concorrentes na rede. Apesar da agressividade, a proposta manteve-se em um nível de justiça aceitável nos cenários caracterizados como piores casos (maior taxa de BER utilizada).

Quanto à percepção do usuário, a proposta teve um desempenho superior em comparação ao TFRC em termos de métricas de QoE, alcançando qualidade boa em cenário infraestruturado (20% de perda) e aceitável na rede ad hoc (20% de perda). Apesar do Fuzzy-TFRC e AJR-TFRC obterem semelhantes resultados no cenário ad hoc de pior caso, via métrica de MOS, porém, considerando o sistema visual humano, a proposta desenvolvida neste artigo alcançou um rendimento superior (percentual de 10%) em relação ao AJR-TFRC.

Para trabalhos futuros, o Fuzzy-TFRC será otimizado levando em consideração os níveis de saturação da camada MAC, de forma a aprimorar a equação da vazão para estimar uma taxa de envio compatível aos níveis de saturação, além de avaliar o seu índice de justiça quando concorrer com fluxos TCP adaptados para redes sem fio. O Fuzzy-TFRC será também avaliado por meio de cenários reais (*testbed*), onde serão definidos novos valores limites para a delimitação dos conjuntos fuzzy.

REFERÊNCIAS

BULHMAN, José; CABIANCA, Antônio. **Redes lan/man wireless i: padrões 802.11 a, b e g.**, 2006. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrwlanman1/default.asp>>. Acesso em: 01 out. 2010.

BRADEN, R. (Ed.). **Requirements for Internet Hosts – Communication Layers.** RFC 1122. IETF, 1989. Disponível em: <<http://www.freesoft.org/CIE/RFC/1122/index.htm>>. Acesso em: 4 jan. 2011.

CHEN, Minghua; ZAKHOR, A. Multiple TFRC Based Rate Control for Wireless Networks. **IEEE Multimedia Transactions on.** v. 8. October/2006.

COQUEIRO, Thiago A. S; Dias, Kelvin. AJR-TFRC: Um Mecanismo para Controle de Congestionamento para Redes Ad Hoc de Múltiplos Saltos. **Conferência Latino Americano de Informática.** Asuncion, Paraguay. Outubro/2010.

EVALVID. 2009. Disponível em: <<http://www.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/>>. Acesso em: 26 set. 2009.

FLOYD, S.; HANDLEY, M.; KOHLER, E. **Problem Statement for the Datagram Congestion Control Protocol (DCCP).** RFC 4336. IETF, 2006. Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/rfc4336>>. Acesso em: 10 mai. 2010.

FLOYD, S.; KOHLER, E. **Profile for Datagram Congestion Control Protocol (DCCP) Congestion Control ID 2: TCP-like Congestion Control.** RFC 4341. IETF, 2006a. Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/rfc4341>>. Acesso em: 24 jun. 2010.

_____. **Profile for Datagram Congestion Control Protocol (DCCP) Congestion Control ID 3: TCP-Friendly Rate Control (TFRC).** RFC 4342. IETF, 2006b. Disponível em: <<http://www.rfc-archive.org/getrfc.php?rfc=4342>>. Acesso em: 4 jan. 2011.

_____. **TCP Friendly Rate Control (TFRC): The Small-Packet (SP) Variant.** RFC 4828. IETF, 2007. Disponível em: <<http://datatracker.ietf.org/doc/rfc4828/>>. Acesso em: 18 set. 2010.

HOSSAIN, Ekram. **IEEE802.16/Wimax-Based Broadband Wireless Networks: Protocol Engineering, Applications, and Services.** Communication networks and services research, 2007. Cnsr '07. Fifth Annual Conference On. Frederlcton, 17 de maio de 2007.

J.POSTEL. **Transmission Control Protocol.** RFC 793. IETF, 1981. Disponível em: <<http://www.rfc-ref.org/RFC-TEXTS/793/index.html>>. Acesso em: 15 jul. 2010.

JACOBSON, V. et al. **TCP Extensions for High Performance.** RFC 1323. IETF, 1992. Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc1323.txt>>. Acesso em: 07 de fev. 2010.

JAIN, R. **The Art of Computer Systems Performance Analysis.** New York: John Wiley, 1991.

KOHLER, E.; HANDLEY, M.; FLOYD, S.. **Datagram Congestion Control Protocol (DCCP).** RFC 4340. IETF, 2006. Disponível em: <<http://www.faqs.org/rfcs/rfc4340.html>>. Acesso em: 16 jan. 2011.

KUROSE, James; ROSS, Keith. **Redes de computadores e a internet: uma abordagem top-down.** 3. ed. São Paulo: Person, 2006.

LAMBRECHT, Christian.; VERSCHEURE, Olivier. Perceptual quality measure using a spatio - temporal model of the human visual system. Digital Video Compression: Algorithms and Technologies, pag. 450-461, 1996.

LI, Qi; CHEN, Di; LIU, Yuncai; ZHENG, Lina. Jitter Ratio Based TFRC Scheme In Wireless-Wired Hybrid Network. International Conference on Digital Telecommunications. Cote d'Azur, France. August/2006.

LUO, Haiyan, et. al. **TFRC-Based Rate Control for Real-Time Video Streaming over Wireless Multi-hop Mesh Network**. IEEE International Conference on Communications. 1-5. Dresden, 2009.

NASCIMENTO, Kiuza Fraga. **Marcação de Tráfego em Redes DiffServ**. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

NAVARATNAM, P.; AKHTAR, N.; TAFAZOLLI, R. On the Performance of DCCP in Wireless Mesh Networks. **In The 4-th Acm International Workshop On Mobility Management And Wireless Access**. Malanga, 2 out. 2006.

NIVOR, Experimental study of DCCP for multimedia applications. New York: Conext '05 Proceedings Of The 2005. **Acm Conference On Emerging Network**. New York, 2005.

NS-2. **Network simulator**. 2009. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>. Acesso em: 03 de mai. 2010.

PACK, Sangheon; SHEN, Xuemin; MARK, Jon; CAI, Lin. A Two-Phase Loss Differentiation Algorithm for Improving TFRC Performance in IEEE 802.11 WLANs. **IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS**. v. 6, n. 11. November/2007.

PADHYE, J.; WIDMER, J. **TCP Friendly Rate Control (TFRC)**: Protocol Specification. RFC 3448. IETF, 2003. Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3448.txt>>. Acesso em: 3 jan. 2010.

PETERSON, Larry; DAVIE, Bruce. **Redes de Computadores**: uma abordagem de sistemas. 3. ed: Elsevier, 2004.

POSTEL, J. **User Datagram Protocol**. 1981. Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/rfc0768>>. Acesso em: 4 fev. 2011.

SCHULZRINNE, H. et al. **RTP: A Transport Protocol for Real-Time Application**. RFC 1889. IETF, 1996. Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc1889.txt>>. Acesso em: 3 jan. 2011.

SOLDANI; LI, M.; CUNY, R.. **Qos and Qoe Management in UMTS Cellular Systems**. John Wiley & Sons, Ltd. England, 2006.

TANENBAUM. **Computer Networks**. 4. ed. Prentice Hall, 2002.

TANSCHUIT, Ricardo. **Sistemas Fuzzy**. 2007. Disponível em: <<http://www.ica.ele.puc-rio.br/cursos/download/ICA-Sistemas%20Fuzzy.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2008

WANG, Z.; LU, L.; BOVIK, A. **Video quality assessment based on structural distortion measurement**. Signal processing. Image communication. [S.l.], v. 19. 2004.

WIDMER, J.; DENDA, R.; MAUVE, M. A survey on TCP Friendly congestion control. **IEEE Network**, p. 28-37. 15 de maio de 2001.

WINKLER, S. **Perceptual video quality metrics – a review**: digital video image quality and perceptual coding. Cap. 5, CRC Press, 2005.

WU; CHEN, Mei-zhen. JTCP: jitter-based TCP for heterogeneous wireless networks. Selected areas in communications. **IEEE Journal On**. [S.l.]. Maio de 2004. p. 757-766.

ZADEH. **Fuzzy sets**: information and control. vol. 8. Janeiro, 1965.