

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Computação e
Sistemas Digitais

ISSN 1413-215X

BT/PCS/0313

Proposta para Otimização de
Desempenho do Protocolo TCP
em Redes Wireless 802.11

André Aguiar Santana
Tereza Cristina de Melo Brito Carvalho

São Paulo - 2003

1376584

O presente trabalho é parte da dissertação de mestrado apresentada por André Aguiar Santana, sob a orientação da Profa. Dra. Tereza Cristina de Melo Brito Carvalho: "Proposta para Otimização de Desempenho do Protocolo TCP em Redes *Wireless* 802.11", defendida em 26/05/03, na EPUSP.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na Biblioteca de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Santana, André Aguiar

Proposta para otimização de desempenho do protocolo TCP em redes de wireless 802.11 / André Aguiar Santana, Tereza Cristina de Melo Brito Carvalho. – São Paulo : EPUSP, 2003.

p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais ; BT/PCS/0313)

1. Protocolo de Comunicações 2. ATM (Redes de computadores)
I. Carvalho, Tereza Cristina de Melo Brito II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais III. Título IV. Série
ISSN 1413-215X

CDD 004.62
004.65

Proposta para otimização de desempenho do protocolo TCP em redes *wireless* 802.11

André Aguiar Santana

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Computação e Sistemas Digitais
e-mail: andre.santana@poli.usp.br

Tereza Cristina de Melo Brito Carvalho

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Computação e Sistemas Digitais
e-mail: carvalho@larc.usp.br

Abstract. TCP was designed for wired networks and has been highly tuned over the years, due to the constant evolution of the computer network technologies itself. Although the protocol is very efficient on the wired networks, it has been shown to perform poorly on the wireless networks, because it suffers from significant losses due to high bit error rate and handoffs of the wireless network. TCP responds to all data losses indistinctly by invoking congestion control that reduces the network's throughput. This paper presents and evaluates a new solution to TCP's performance losses in wireless networks. Also, the proposed solution should keep the high TCP reliability on end-to-end communications without changes on wired TCP standard and treat the high error rate and disconnections on the wireless communication. The results were obtained from a simulation environment where it is possible to evaluate the solution under different error and disconnection rates and compare it with other TCP's solutions, and with the original TCP itself to verify the benefits obtained in wireless communication.

Resumo. O TCP foi projetado para redes *wired* e vem sofrendo constantes melhorias durante os últimos anos, em função da evolução também constante das tecnologias de rede que o suportam. Embora o TCP seja muito eficiente em redes *wired*, não apresenta bons resultados em redes *wireless*, devido às altas taxas de erro e de freqüentes desconexões decorrentes da mobilidade dos equipamentos neste tipo de rede. O TCP responde a qualquer tipo de perda independente da sua causa, alta taxa de erro ou desconexão, com a ativação do seu mecanismo de controle de congestionamento reduzindo, conseqüentemente, a vazão da rede. Este paper apresenta e avalia uma nova solução para o problema de perda de desempenho do TCP em redes *wireless*, tendo como premissas básicas manter a confiabilidade fim-a-fim do TCP, não alterar o TCP da rede *wired* e tratar problemas referentes à alta taxa de erro e a desconexões momentâneas dos equipamentos. Os resultados obtidos foram validados em um ambiente de simulação onde é possível avaliar o comportamento da solução proposta sob condições diversas de taxa de erro e desconexões e compará-los com de outras soluções já existentes, inclusive o TCP original, verificando-se o ganho de desempenho obtido no caso de sua utilização em redes *wireless*.

1. Introdução

A popularidade das redes *wireless* e de equipamentos portáteis como *notebooks* e *handhelds* tem crescido e vem exercendo um papel cada vez mais importante no dia a dia de nossas vidas. Algumas das aplicações utilizadas nestes equipamentos, requerem transmissão de dados confiável, com um bom desempenho. O TCP (*Transmission Control Protocol*) é o protocolo de transporte mais aceito, confiável e orientado à conexão, usado em redes como a Internet. É um protocolo fim-a-fim que suporta controle de fluxo e congestionamento. Além disso, vem sendo utilizado por inúmeras aplicações, incluindo HTTP, e-mail, transferência de arquivos e de vídeo stream justamente pela sua confiabilidade e desempenho.

Atualmente, é cada vez maior a utilização de sistemas *wireless* em empresas, universidades e outras instituições do mundo inteiro. Assim, não só a utilização das redes *wireless* é uma realidade, como também a coexistência entre as redes convencionais *wired* e as redes *wireless* tendem a crescer muito, unindo os benefícios de ambas. Dentro deste contexto, as redes *wireless* têm que se adaptar ao sistema de

negócio (muitos baseados na arquitetura cliente/servidor) existente hoje na maioria das empresas, tornando a conexão com as redes *wired* transparentes ao cliente final.

O objetivo principal deste trabalho é descrever o motivo da perda de desempenho do protocolo TCP sobre as redes *wireless* e propor uma solução para minimizar esse problema.

2. Visão geral sobre TCP e redes *wireless*

Nesta sessão, serão discutidos, brevemente, mecanismos do protocolo TCP referentes a desempenho e características das redes *wireless* 802.11.

2.1 Protocolo TCP

O protocolo TCP foi definido, inicialmente, pela RFC 793 [POS81] e sofreu diversas alterações até a data de hoje. Na época da sua padronização, existiam muitos problemas em relação à taxa de erro da rede e à largura de banda (muito limitada). Sucessivamente, foram definidas as RFCs 1122 [BRA89] e 1323 [JAC92] para corrigi-los e adicionar mecanismos de melhoria do desempenho do TCP [TAN96]. A evolução para o padrão atual, com uma série de mecanismos de controle, levou em consideração a melhoria na confiabilidade das redes, que possuem atualmente uma taxa de erro baixa em relação aos anos 80. Estes mecanismos ajudaram o TCP a se tornar um dos protocolos mais importantes da Internet. Dentre eles, podemos citar: *controle de fluxo*, *janelas deslizantes* e *controle de congestionamento*.

2.1.1 Confiabilidade fim-a-fim

Para não perder o controle da transmissão, o TCP mantém ponteiros, números sequenciais, que determinam posições na *stream*¹. Quando é transmitida uma determinada quantidade de bytes em um segmento, é enviado o número da sequência no cabeçalho, para que a *stream* seja reconstituído no receptor. Esse número é utilizado para verificar se algum dado foi perdido ou está fora de ordem. O receptor sempre confirma o número de sequência mais alto que recebeu corretamente e que esteja na sequência.

O serviço de transmissão de *stream* de dados com confiabilidade fim-a-fim garante a entrega dos dados sem duplicações, alterações ou perdas. Para isso, o TCP utiliza a técnica conhecida como confirmação positiva com retransmissão [COM95]. Através dela, o receptor envia uma resposta (ACK) para cada segmento, ou grupo de segmentos, recebido corretamente. O transmissor só envia o próximo segmento se já tiver recebido a confirmação de que o anterior chegou corretamente. Além disso, o transmissor mantém um temporizador para cada segmento e, se a confirmação não retornar em um determinado intervalo de tempo (antes que o temporizador estoure), o transmissor retransmite o segmento, pois supõe que ocorreu uma falha. O mecanismo de confirmação do segmento utilizado pelo TCP é chamado de *cumulativo* (positivo), pois controla uma parte da *stream* acumulada e que foi transmitida corretamente. O TCP confia exclusivamente no ACK positivo (ACK de segmentos que chegaram corretamente) e retransmite o segmento quando o ACK correspondente não chega em um determinado período de tempo [STA98].

2.1.2 Controle de fluxo com Janelas deslizantes

O mecanismo de confirmação positiva com retransmissão garante a confiabilidade. A janela deslizante otimiza a transmissão da *stream* pois, sem ele, para cada segmento enviado, o transmissor tem que esperar a chegada de um ACK, e durante esse período de espera o transmissor fica sem nenhuma tarefa. A principal idéia da janela deslizante é que o transmissor continue enviando informações, até um certo limite, antes de receber um ACK. Com isso, é possível, portanto, enviar muitos segmentos (desde que o total de bytes desses segmentos não ultrapasse o tamanho da janela deslizante) sem uma confirmação. Todos os segmentos continuam com a necessidade de reconhecimento para garantir a confiabilidade fim-a-fim; apenas não é enviado um ACK para cada segmento e sim um ACK para um conjunto de

¹ Sequência contínua de dados.

segmentos. Depois que o transmissor enviou os primeiros segmentos da janela, ele fica aguardando o ACK. Assim que algum ACK chegar indicando que os segmentos referentes a ele foram entregues, a janela desliza sobre a stream de bytes, possibilitando o envio de mais dados.

A janela tem um valor variável, de acordo com o RTT^2 (*Round Trip Time*) da rede, sendo medido em bytes. A padronização do TCP permite que o tamanho da janela varie com o passar do tempo, pois cada ACK que o receptor envia para confirmar um segmento especifica o tamanho da janela. Se o *buffer* do receptor estiver quase no limite, ele pode enviar uma mensagem ao transmissor, através do ACK, para diminuir o tamanho da janela. Dependendo do comportamento da rede, o receptor pode indicar um tamanho zero de janela (*ZWA – Zero Window Advertisement*) para interromper todas as transmissões [COM95].

2.1.3 Controle de congestionamento

Sempre que o TCP perceber que ocorreu uma falha na transmissão, ele retransmite o segmento e ativa o controle de congestionamento, pois para o TCP, como, atualmente, a taxa de erro de uma rede *wired* é muito baixa (10^{-7}) sempre que houver uma perda, é exclusivamente devido ao congestionamento. Com este mecanismo, o TCP reduz a transmissão dos segmentos, para que a rede possa voltar ao estado normal, sem o congestionamento.

O controle de congestionamento altera o valor da **janela do transmissor**, através do tamanho da **janela do receptor** e da **janela de congestionamento**. A primeira, é o tamanho do *buffer* do receptor e a segunda, um valor que o transmissor utiliza para diminuir a vazão da rede, quando ocorrer uma perda de segmento. O tamanho da **janela do transmissor** é igual ao tamanho da janela que tem o menor valor, entre a **janela do receptor** e a **janela de congestionamento**.

Para estabelecer uma conexão, o TCP padroniza que o transmissor deve enviar apenas um segmento para o receptor. Se o receptor enviar um ACK confirmando o recebimento desse segmento antes de estourar o *timeout* da conexão, são enviados dois segmentos. Caso retorne o ACK corretamente, são enviados mais quatro e assim por diante. O crescimento irá se manter até ocorrer um *timeout* ou atingir o tamanho máximo do espaço de armazenamento do receptor. Esse algoritmo é conhecido como *slow start* (Figura 2.1). No algoritmo, também é definida uma variável que reflete o congestionamento, *threshold* (limite de congestionamento). Quando é detectado um congestionamento, isto é, quando estoura o temporizador corrente da conexão, é configurado o *threshold* com o valor da metade do tamanho atual da **janela de congestionamento**. Além disso, a própria **janela de congestionamento** é configurada para um segmento, então é iniciado o processo de *slow start* até atingir o *threshold*. Desse ponto em diante, o crescimento da janela é linear (no máximo um segmento por rajada). Assim o algoritmo de controle de congestionamento corta pela metade a taxa de transmissão, depois cresce linearmente para diminuir o congestionamento [TAN96].

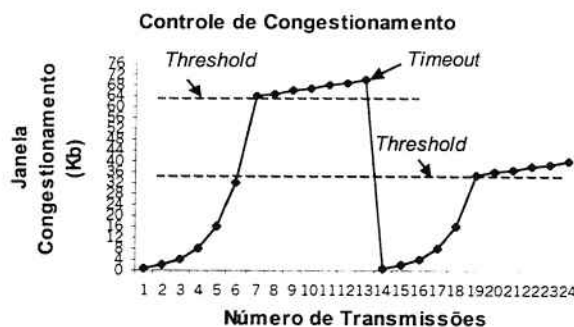


Figura 2.1 - Controle de congestionamento: slow start

² Tempo total para o segmento TCP percorrer a rede e voltar a confirmação.

2.2 Redes wireless 802.11

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) constituiu um grupo chamado de *Wireless Local-Area Networks Standard Working Group*, com a finalidade de criar padrões para redes *wireless*, definindo a camada física, e um protocolo de controle de acesso ao meio, o DFWMAC (*Distributed Foundation Wireless Medium Access Control*), que se tornou o padrão IEEE 802.11 [ANSI99].

A arquitetura de uma rede 802.11 é baseada em células que são chamadas de **Áreas de Serviço de Base (BSA – Based Service Area)**. O grupo de estações que se comunica em uma célula é chamado de **Conjunto de Serviço de Base (BSS – Based Service Set)**. As células são controladas por uma **Estação Base (BS – Base Station)**, também conhecidas como **Ponto de Acesso (AP – Access Point)**.

A maioria das WLANs é formada por **redes estruturadas**³ (Figura 2.2) [STA97]. Nelas, a transferência de informação ocorre sempre entre uma estação e um ponto de acesso (AP). Os APs são nós especiais responsáveis pela captura e retransmissão das mensagens enviadas pelas estações. A transferência da informação nunca ocorre diretamente entre duas estações. O AP pode, também, agir como uma ponte para outra rede (cabeadas ou sem fio). Os equipamentos que pertencem a uma rede *wired* são chamados de equipamentos fixos (**FH – Fixed Host**) e os das redes *wireless* são denominados equipamentos móveis (**MH – Mobile Host**), como ilustrado na Figura 2.2 [GEI02].

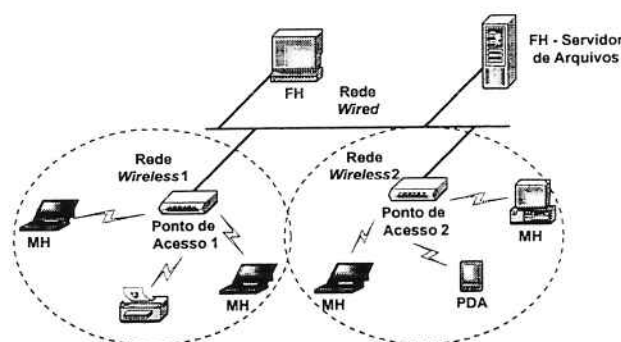


Figura 2.2 - Rede wireless estruturada

Outro tipo de configuração para as redes *wireless* é a *ad hoc*. Cada estação comunica-se diretamente com outra estação. Nenhum AP é necessário para controlar o acesso ao meio. Uma estação *A* só pode se comunicar com uma estação *B*, se *B* estiver dentro do raio de ação de *A* ou se existir uma ou mais estações entre *A* e *B* que possam encaminhar a mensagem.

2.2.1 Roaming

O *roaming* permite que estações mudem de célula e continuem enviando e recebendo informações, sem perder a conexão. Sistemas de *roaming* empregam arquiteturas de células que usam pontos de acesso (AP) estrategicamente localizados. Existe um pequeno período entre a troca de células, onde o MH (*Mobile Host*) é desconectado, o *handoff*⁴. Esse período é totalmente transparente para o usuário, pois o TCP não perde a conexão, apenas alguns pacotes. O período de *handoff* irá causar uma redução na transmissão do TCP, pois como alguns pacotes são perdidos, o protocolo interpreta que a rede está congestionada, e assim, ativa o controle de congestionamento, resultando na diminuição do desempenho.

2.3 Características das redes WLAN

Um dos motivos para a perda de desempenho do TCP, são as diferentes características das redes *wireless*:

- **Bit Error Rate (BER):** A taxa de erro das redes *wireless* é muito maior que nas redes *wired*. De acordo com [PEN00], a ordem de erro em uma rede *wired*, para a qual o TCP foi desenvolvido, chega a $10^{-6} - 10^{-8}$. Em contrapartida, o BER das redes *wireless* é muito maior, atingindo 10^{-3} .

³ **Redes estruturadas** são aquelas que dependem de uma infra-estrutura pré-instalada para seu funcionamento, a exemplo das redes *wired* e das redes móveis baseadas em AP.

⁴ Quando os equipamentos trocam de células devido à mobilidade.

- **Largura de Banda:** A maioria das redes *wireless* atuais opera com banda estreita (2Mbps até 11Mbps em média) comparada às redes *wired* (10Mbps até 100Mbps, podendo chegar a 1Gbps).
- **Round Trip Time (RTT):** As redes *wireless* têm um tempo de latência maior que as redes *wired*, por exemplo uma WLAN 802.11 tem como RTT médio 20ms e uma rede LAN 5ms. Como o *timeout* do ACK do TCP utiliza como base a estimativa do RTT do segmento, em redes heterogêneas o aumento no atraso pode ser muito custoso em termos de desempenho.
- **Mobilidade:** Os equipamentos movem-se de uma célula para outra (*handoffs*), cortando a comunicação momentaneamente.

3. Descrição do problema

Esta sessão tem como objetivo descrever em mais detalhes o problema da perda de desempenho do TCP sobre redes *wireless*, apresentando o cenário, o problema e a análise do comportamento do TCP.

3.1 Cenário

Para estudar o problema, será adotado um cenário básico de redes heterogêneas, *wired* e *wireless* conectadas entre si. Os principais componentes desse ambiente são:

- **Equipamentos Fixos (FH):** correspondem, principalmente, a servidores que pertencem exclusivamente à rede *wired*.
- **Equipamentos Móveis (MH):** são equipamentos que pertencem exclusivamente à rede *wireless*, tais como estações de trabalho, *notebooks* e *handheld*.
- **Ponto de Acesso (AP):** controla os MH de cada célula *wireless* e realiza a função de *gateway* entre as redes *wired* e *wireless*.

Além disso, os testes foram feitos em redes heterogêneas, conectando redes *wired* e redes *wireless*. O número de usuários em cada ponto de acesso (AP) não deve ser muito elevado, pois segundo o padrão 802.11b, operando à taxa máxima de 11Mbps, há uma queda de desempenho, se muitas conexões fossem estabelecidas simultaneamente. Outra característica é a distância entre o MH e o AP. Quanto maior for a distância entre um MH e o AP, pior é a qualidade do sinal recebido e, como resultado maior é a taxa de erro.

3.2 Apresentação do problema a ser resolvido

O principal problema envolvendo a perda de desempenho do TCP sobre redes *wireless* é que o TCP empregado originalmente em redes *wired* supõe que toda perda de pacotes, independente da natureza, é devido a congestionamento. Conseqüentemente, nas redes *wireless*, é invocado o controle de congestionamento do TCP, que reduz bruscamente a taxa de transmissão, devido à perda de pacotes, sem saber efetivamente se houve congestionamento ou não, pois em redes *wireless*, essa perda provém não só de congestionamento, mas de erros na transmissão e perda na conexão devido à mobilidade [TAN96].

3.3 Avaliação do comportamento do TCP

Para analisar o problema, foi feito um experimento, onde vários tamanhos de arquivos diferentes foram transmitidos em uma rede *wired* e uma rede heterogênea, não simultaneamente, através de uma aplicação FTP (que utiliza o TCP como protocolo de transporte). Para coletar os parâmetros de desempenho, foi usado o *tcpdump*⁵ [JAC89]. Os resultados da avaliação são apresentados na Figura 3.1.

Na Figura 3.1a, devido à elevada taxa de erro nas redes *wireless*, a janela de congestionamento não mantém um valor constante. A cada erro, o valor da janela é reduzido e conseqüentemente, a vazão da rede também. Na Figura 3.1b, como a rede *wired* não tem uma alta taxa de erro, o valor de sua janela

⁵O *tcpdump* permite realizar uma análise detalhada de vários parâmetros de uma conexão TCP como janela de congestionamento, pois funciona semelhante a um *sniffer* e consegue monitorar todos os pacotes que passam por sua interface de rede.

se mantém constante e sem muitas variações como na Figura 3.1a, da rede heterogênea. Assim, podemos concluir que a perda de vazão do TCP em uma rede heterogênea é devido à alta taxa de erros na rede *wireless*, que o TCP trata como congestionamento, ativando o controle de congestionamento.

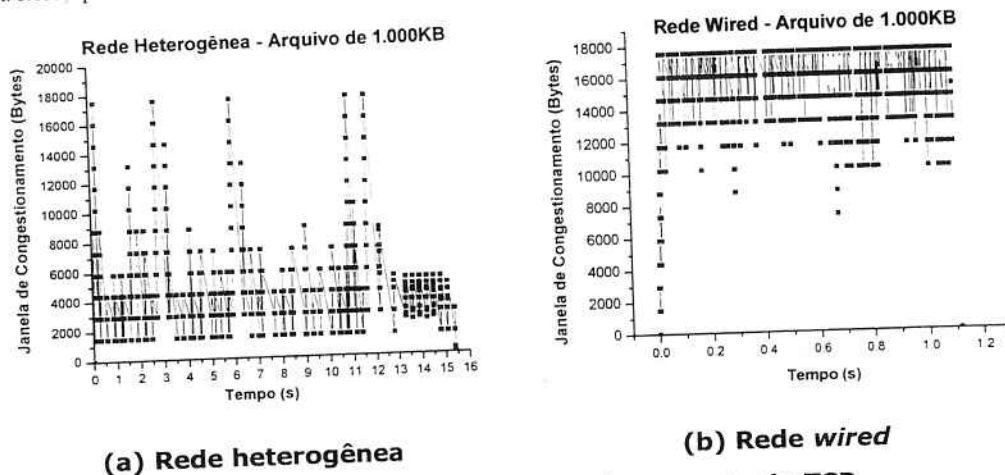


Figura 3.1 – Janela de Congestionamento do TCP

4. Trabalhos relacionados

O principal objetivo deste trabalho é propor e validar uma solução para otimizar o protocolo TCP em redes *wireless*. Para tanto, foi realizado um estudo sobre outras propostas de trabalho com a mesma finalidade. Esta sessão apresenta um quadro comparativo, Tabela 4.1, com os principais protocolos estudados.

A Tabela 4.1 compara os protocolos estudados [ANN01] [BAK94] [BAL97] [CAS02] [GOF00] [PAT01] [SIN02] em muitos aspectos. Contudo, alguns dos critérios relacionados são mais relevantes que outros para a elaboração da solução. Devido às características das redes *wireless* e do TCP, os principais requisitos que uma solução deve ter para resolver o problema do TCP sobre redes heterogêneas é (i) suporte da semântica fim-a-fim do TCP, (ii) controle de altas taxas de erro, (iii) não alteração do código do FH e (iv) baixo custo de implementação. Levando-se em considerações estes requisitos, podemos concluir, observando os dados da Tabela 4.1, que a solução *snoop* é a que melhor atende a todos.

5. Solução Proposta

Baseado no estudo das soluções já existentes para o problema, foi elaborado a especificação de requisitos da proposta e desenvolvido a solução para otimização do TCP sobre redes heterogêneas.

5.1 Especificação de requisitos

Antes de propormos uma solução adequada para o problema do desempenho do TCP sobre redes *wireless*, é necessário determinar os requisitos básicos que esta solução deve atender:

- A proposta deve contemplar a otimização de desempenho do protocolo TCP sobre redes heterogêneas (*wired* e *wireless*), isto é, redes estruturadas, pois são as mais comuns encontradas no mercado corporativo, com servidores na rede *wired*, e o cliente na rede *wireless*. Este é o cenário que deve ser priorizado na solução.
- O TCP, atualmente, é um dos protocolos mais utilizados em redes *wired*. Sendo assim, a maioria das aplicações desenvolvidas nos últimos anos, utilizam seus serviços. Por este motivo, a solução não deve alterar o TCP da rede *wired*.

- No caso das redes *wireless* e dos APs, como começaram a ser utilizadas de forma comercial há pouco tempo, ainda não há um número expressivo de equipamentos. Sendo assim, uma alteração não muito complexa, no TCP destes equipamentos, pode ser considerada sem maiores consequências.
- Um dos principais motivos do sucesso do TCP é a confiabilidade provida na transmissão dos segmentos. Sendo assim, a solução não pode alterar esta característica.
- A solução deve tratar problemas de alta taxa de erro e desconexões, características das redes *wireless*.

5.2 Apresentação da solução

Para resolver o problema da alta taxa de erro da rede *wireless* a solução utiliza um mecanismo que armazena os segmentos em um nó anterior à rede *wireless*, que também tenha acesso à rede *wired*, como o ponto de acesso (AP), e reenvia-o para o MH, caso ocorra alguma perda na rede *wireless*. Para isso é preciso que o AP monitore as conexões TCP, e armazene os segmentos que estão sendo enviados à rede *wireless*. Também devem ser processados todos os ACKs para saber quais segmentos armazenados já podem ser descartados e quais ainda podem ser reenviados para a rede *wireless*. Além disso, devem ser criados temporizadores para cada segmento que passar pelo AP, para que se estourar o tempo, eles sejam retransmitidos, antes que ocorra um *timeout* no transmissor e o controle de congestionamento seja ativado. Esse mecanismo é muito semelhante ao protocolo *snoop* [BAL95].

O *snoop* retransmite um segmento sempre que chegar um ACK repetido ou ocorra algum estouro de temporizador (indicando que algum segmento foi perdido), com o cuidado de não retransmiti-lo muitas vezes e não retransmiti-lo logo após o primeiro ACK. Sendo assim, quando o AP encontrar um ACK, ele deve tomar uma decisão:

- O ACK traz a confirmação de um novo segmento. O AP deve apagar do *buffer* esse segmento, pois não será necessário retransmiti-lo.
- O ACK traz um número de sequência repetido. Com essa informação, o AP identifica que é o ACK de um segmento que se perdeu. O AP reenvia o segmento perdido para o MH, e mantém o ACK, sem transmiti-lo diretamente para o FH. Cada ACK que chegar na sequência deve ser armazenado até que o ACK referente ao segmento faltante chegue ao AP. Esse ACK deve chegar até o tempo RTO (*Retransmit TimeOut*) do transmissor, senão é reenviado o pacote por *timeout* e ativado o controle de congestionamento. Se isso acontecer, o AP recebe uma cópia de um pacote que já está no *buffer* e sabe que ocorreu essa situação. Então, ele envia todos os ACKs armazenados (que estava segurando) e continua a comunicação normalmente.

O problema, quando se utiliza o *snoop* em uma rede *wireless*, é que podem ocorrer perdas dispersas de segmentos na *stream* da janela do receptor, e como ele apenas retransmite um segmento de cada vez, não é suficiente para que, em todos as perdas de segmentos, não ocorra um *timeout* no segmento do TCP do FH, fazendo com que este entre no procedimento controle de congestionamento. Ou seja, o problema continua.

Para resolver esta situação, a solução proposta implementa um mecanismo onde o TCP receptor do MH indica quais são os segmentos que estão faltando para o AP, através de um ACK seletivo (um ACK seletivo para cada segmento faltante na *stream*), e este reenvia todos esses segmentos de uma vez. Com isso, ao invés de retransmitir um segmento e esperar pelo próximo ACK para retransmitir outro, são enviados todos de uma só vez.

No exemplo da Figura 5.1, estão sendo transmitidos 8 segmentos pela rede heterogênea. Os segmentos são enviados do FH para o MH, passando pelo AP. Em t_1 , são enviados os 4 primeiros segmentos. Em t_2 , como não ocorreu nenhuma perda na rede, o MH envia os 4 ACKs. No terceiro período, t_3 , depois que o FH recebeu os 4 ACKs, envia mais quatro segmentos (Seq=5, Seq=6, Seq=7 e Seq=8). Nesta transmissão, ocorreram 2 perdas de segmento (Seq=6 e Seq=7), devido à rede *wireless*. No próximo instante, t_4 , o FH envia um ACK reconhecendo o segmento número 5 e 8. Nesse instante, o algoritmo da nova solução percebe que está faltando dois segmentos na *stream* do receptor, pois recebeu o número 5 e o 8. De acordo com o algoritmo do *snoop*, retransmitido o segmento 6 no próximo *slot* de tempo e só depois de receber o ACK6, será retransmitido o segmento número 7. A solução proposta, altera o TCP do MH para, quando detectado que mais de um segmento se perdeu na mesma janela, envia um ACK seletivo para cada segmento perdido, direto para o AP, que é o que aconteceu no t_4 . Quando o

MH enviou o segundo ACK5, devido à chegada do Seq=8, já enviou um ACK seletivo para a retransmissão do segmento número 7. Ainda no período, t_4 , o AP recebe o ACK normal referente ao segmento número 6, e também o ACK seletivo, referente ao número 7. É importante ressaltar que nenhum dos ACKs foram enviados para o FH. Já no período seguinte, t_5 , o ponto de acesso retransmite o segmento número 6 e o 7, de uma vez só. Em t_6 , os ACKs referentes aos dois últimos segmentos chegam no FH, finalizando a transmissão sem ativar o controle de congestionamento. Além disso, se fosse usado o *snoop* original, a finalização iria demorar mais dois períodos de tempo. Um para receber o ACK7 e outro para retransmitir o segmento número 7. Quando o próximo segmento for enviado para o MH, por exemplo o Seq=9 e for reconhecido com o ACK9, o FH saberá que todos os segmentos até o número 9 estão no MH, incluindo o segmento número 8, que, devido à perda dos segmentos de número 6 e 7, não foi enviado um ACK8.

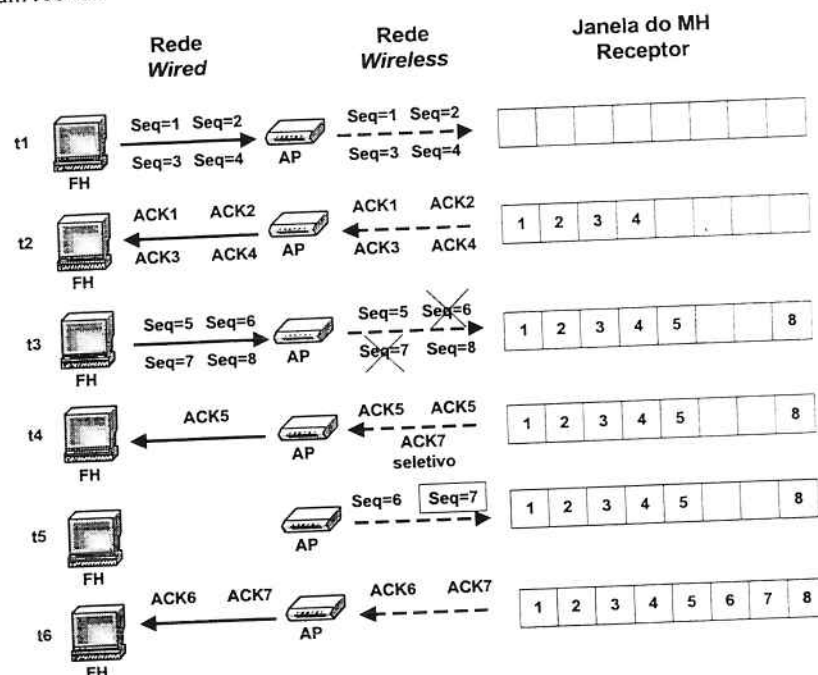


Figura 5.1 – ACK seletivo para solução proposta

Este mecanismo, retransmissão com ACK seletivo, otimiza também o TCP em presença de *handoff*. Quando ocorrer uma desconexão, os segmentos irão se perder, enquanto o MH não voltar a se comunicar com o AP. Assim que o primeiro sinal de conexão for enviado pelo MH, com os ACKs seletivos, todos os segmentos perdidos serão enviados ao MH, de uma única vez. O único limite para esta situação é o tamanho do *buffer* do AP, que dependendo do volume de segmentos transmitidos, pode não conseguir armazená-los, e assim, não poderá retransmiti-los.

Embora a proposta seja conceitualmente um protocolo de camada de transporte, é implementado na camada de rede (IP), por questões de simplicidade, pois nesse nível é possível acessar os cabeçalhos do IP e do TCP facilmente, um para identificar o equipamento e outro para identificar o número do segmento. Para a solução proposta do *snoop otimizado*, será criado um módulo dentro do ponto de acesso (AP), onde é feita uma alteração no *snoop* e no MH, criando um protocolo de comunicação entre eles, para que o MH avise o *snoop* de todos os segmentos perdidos e esse possa retransmiti-los.

5.3 Avaliação da solução proposta

A escolha da solução do *snoop otimizado* foi baseada no estudo dos protocolos já existentes para resolver o problema da perda de desempenho do TCP, por atender os requisitos levantados anteriormente:

- **Redes heterogêneas** – a solução do *snoop otimizado* é proposta para redes onde exista um ponto de acesso central na comunicação, como AP, pois é ele quem retransmite os segmentos para o MH. Assim, necessariamente é uma proposta para ser usada em redes heterogêneas.

- **Alteração do FH** – a solução não precisa alterar o TCP da rede *wired*. Para o FH, a solução é transparente.
- **Confiabilidade fim-a-fim** – o novo protocolo preserva a confiabilidade do TCP, pois apenas envia um ACK para o transmissor, se receber um ACK do MH, informando que o segmento já foi entregue.
- **Mobilidade** – a principal característica da proposta apresentada é a retransmissão com o ACK seletivo, entre o ponto de acesso e o MH, para tratar perdas de segmentos na rede *wireless* e desconexões, como *handoff*.
- **Custo de Alteração** – a solução efetua alterações muito simples no TCP da rede *wireless* e no AP, através da verificação dos segmentos que estão faltando na *stream* do receptor, envio dos ACKs seletivos e retransmissão dos segmentos.

A principal vantagem da solução proposta é que ela otimiza o TCP em um ambiente onde a taxa de erro é elevada e há freqüentes desconexões, porém há um limite do tamanho do *buffer* no AP, que limita o tempo máximo de desconexões. A grande maioria dos protocolos desenvolvidos para o mesmo propósito, não abrange todos esses requisitos que fazem parte do mundo *wireless*.

6. Validação da solução proposta

A validação da solução foi feita com o simulador de redes *ns2*⁶ (*Network Simulator*) [VIN95], uma ferramenta dirigida por eventos discretos, que simula ambientes *wired* e *wireless* [FAL98]. Esse simulador funciona a partir de comandos em arquivos de *scripts Tcl*⁷ (*Tool command language*), porém seu núcleo foi desenvolvido em C++. O *ns2* pode ser resumido em um interpretador de script Tcl orientado a objeto e uma biblioteca de funções e objetos. Esta biblioteca contém objetos de escalonador de eventos, objetos de componentes de rede e módulos e funções de configuração de rede, além de objetos desenvolvidos pelos próprios usuários. Para configurar e executar o *ns2*, o usuário deve escrever um script Tcl que inicia um escalonador de eventos, configura a topologia da rede utilizando objetos e funções da biblioteca, e configura fontes de tráfego para iniciar e parar a transmissão de pacotes, através do escalonador de eventos. Apesar o simulador possuir uma biblioteca com muitos objetos de rede, o usuário pode precisar de algum novo componente, assim, o *ns2* permite que se crie uma nova classe de objetos ou apenas se modifique algum objeto da biblioteca já existente. Essa característica permitiu o desenvolvimento do **snoop otimizado** no simulador, através da alteração das classes de objetos, em C++, do *snoop* e o TCP. O TCP foi modificado para enviar os ACKs seletivos e o *snoop* para retransmitir os segmentos quando receberem estes ACKs.

A grande disponibilidade de objetos para ambientes diversos de rede e a flexibilidade, foram um dos principais motivos pelo qual o *ns2* foi selecionado para se efetuar simulações da proposta apresentada. Além disso, devido à sua grande aceitação e utilização no estudo de protocolos e redes de computadores, é fácil a replicação da proposta por outros pesquisadores e a sua utilização em futuros estudos relacionados ao mesmo tema desta dissertação.

O principal objetivo da simulação foi avaliar o comportamento do TCP otimizado é comparar o seu desempenho, em termos da vazão de rede, com o do protocolo TCP padrão, TCP Westwood, TCP SACK e TCP *snoop*. A implementação usada do TCP padrão (original) é a do TCP Reno, pois ela contempla características básicas do TCP.

Teste 1 – Desempenho dos protocolos TCP em função do BER

Neste teste, são gerados gráficos, da vazão da rede para uma aplicação FTP que, continuamente, transmite dados durante 100 segundos. Para cada transferência de dados, é configurada uma taxa de erro (BER) para a rede *wireless* diferente, iniciando-se com 10^{-6} e aumentando, gradativamente, até 10^{-3} . Não ocorre *handoffs* durante os testes e utilizou-se um *buffer* de 600 segmentos no ponto de acesso, para garantir que

⁶ *ns2* (Network Simulator versão 2.0) é um simulador de eventos discreto com o objetivo centrado em pesquisas em redes. Este é um software desenvolvido na Universidade de Berkeley em C++ e OTcl (linguagem de script TCL com extensão orientada a objeto desenvolvido no MIT), sendo um software orientado a objeto.

⁷ Tcl (*Tool command language*) é uma linguagem de script interpretada usada para construir cenários de simulação no *ns2*.

nos piores casos de taxa de erro não haja problemas de perda de segmentos no ponto de acesso por falta de espaço de armazenamento.

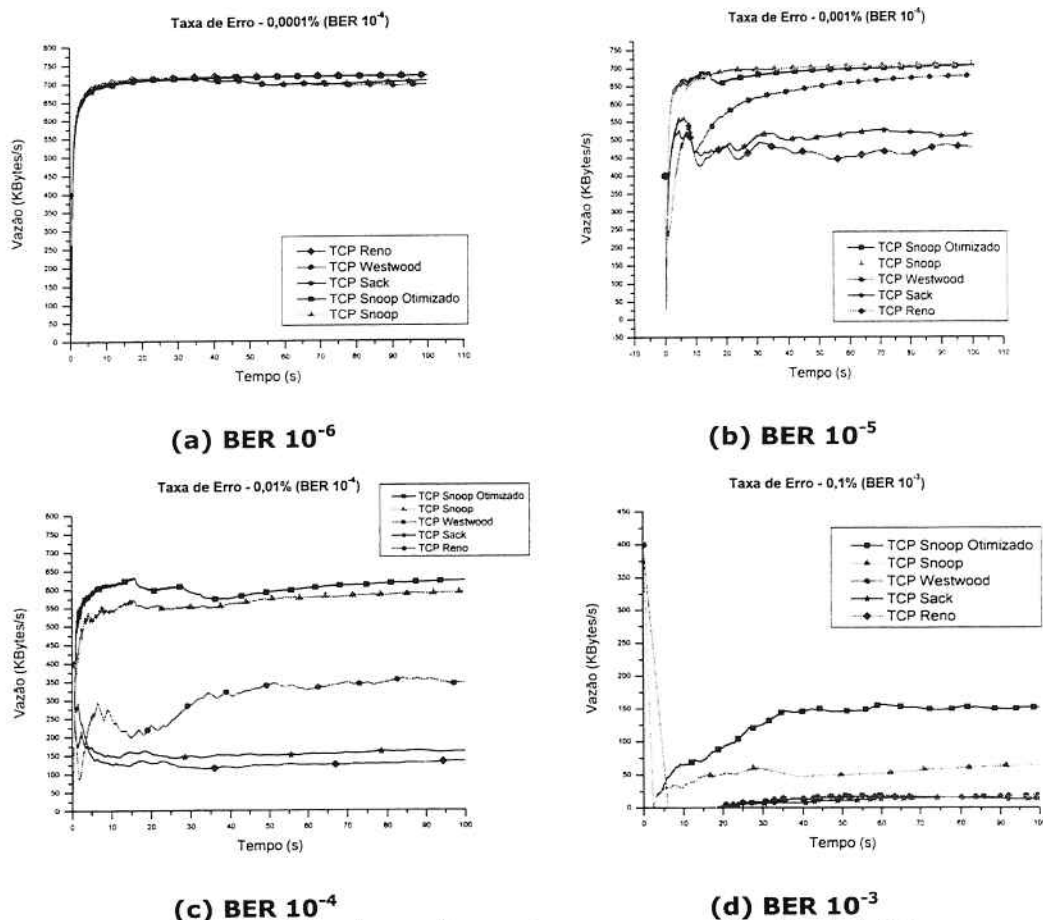


Figura 6.1 – Gráfico de vazão por tempo com variação do BER

Pela Figura 6.1, é possível concluir que a solução proposta apresenta um desempenho semelhante aos outros protocolos, se o BER é baixo, como 10^{-6} . Quando mais o BER é aumentado, mais o **snoop otimizado** se destaca em relação às outras soluções. Na pior taxa de erro, Figura 6.1c, com BER de 10^{-3} , essa diferença é bem acentuada.

Teste 2 - Desempenho dos protocolos TCP em função do *handoff*

Nesta simulação, o tempo de desconexão é inserido em três instantes, de 10, 60 e 140 seg. Assim, para cada período de desconexão, 2 e 5 segundos, há três *handoffs* na conexão entre o ponto de acesso e o MH.

Nesta simulação, Figura 6.2, o **snoop otimizado** tem uma vazão melhor que os demais protocolos, independente do tamanho da desconexão, devido ao seu mecanismo de retransmissão com ACK seletivo. Quando maior for a desconexão, mais o desempenho da solução proposta se aproxima do **snoop**, pois o tamanho do *buffer* limita a transmissão dos segmentos perdidos. Se a desconexão for grande, não haverá tempo para a retransmissão, antes que o segmento saia do *buffer* do AP.

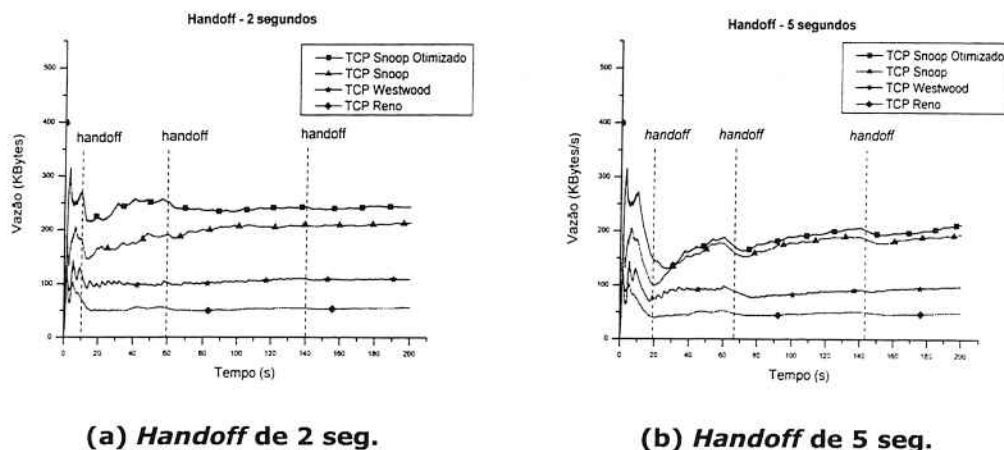


Figura 6.2 – Gráfico de vazão por tempo com variação do *handoff*

Teste 3 – Influência do tamanho do buffer (AP) na solução

Pela comparação apresentada na Figura 6.3, quanto menor o *buffer* mantido no ponto de acesso para armazenar segmentos que podem ser retransmitidos no caso de perda da rede *wireless*, menor é o desempenho da solução apresentada. Isto também ocorre para o protocolo *snoop*, que opera segundo o mesmo princípio. Através deste mesmo gráfico da Figura 6.3, podemos notar que quando o tamanho do *buffer* atinge a capacidade de armazenamento de 60 segmentos, ocorreu a vazão máxima da rede. Isso significa que, para o teste apresentado, onde por 3 vezes aconteceu uma desconexão de 5 segundos e a taxa de erro era de 10^{-4} , não adiantaria aumentar o *buffer*, que ele não seria utilizado.

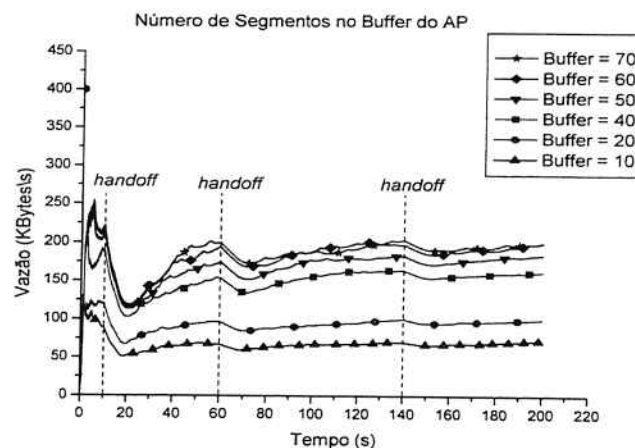


Figura 6.3 – Interferência do *buffer* do AP

6.1 Análise dos resultados

Na Figura 6.1a, onde se adotou uma taxa de erro de 10^{-6} , típica de uma rede *wired*, o desempenho de todas as soluções é muito semelhante, pois todos os protocolos tratam apenas da otimização do TCP em uma rede onde a taxa de erro é elevada. Nas simulações seguintes, a solução proposta, *snoop otimizado*, obteve uma vazão superior aos outros protocolos, independente da taxa de erro. Apenas em uma simulação, com BER de 10^{-5} , o *snoop* obteve um desempenho superior no início do período, mas logo os dois estavam com a mesma taxa de transmissão. A Tabela 6.1 mostra uma comparação entre a

porcentagem de perda de desempenho dos protocolos simulados no ambiente de redes heterogêneas em relação à rede *wired*, com diferentes taxas de erro na rede *wireless*.

Tabela 6.1 – Comparação dos protocolos analisados

Protocolos	% de Perda de vazão da rede <i>wireless</i> em relação ao TCP Reno sobre uma rede <i>wired</i>			
	BER = 10^{-6}	BER = 10^{-5}	BER = 10^{-4}	BER = 10^{-3}
Snoop Otimizado	6,6%	9,8%	19,8%	82,4%
Snoop	6,6%	9,2%	24,5%	92,9%
Westwood	7,0%	18,0%	55,4%	97,9%
SACK	8,4%	33,7%	79,1%	98,1%
Reno (padrão)	8,7%	38,6%	82,7%	98,2%

De um modo geral, o protocolo *snoop* obteve um desempenho superior a todas as outras soluções. Apenas o *snoop otimizado* conseguiu atingir um desempenho melhor que ele. Os testes mostraram que a solução implementada foi eficaz em relação a original, comprovando que o custo na alteração no MH não é tão elevado, se levarmos em consideração o ganho de desempenho obtido em todos os testes da solução em relação ao *snoop*.

O protocolo TCP Westwood, também, destacou-se em relação ao desempenho, quando o BER da rede era igual ou superior à taxa de erro de 10^{-4} . Para valores menores, o protocolo comportou-se de modo semelhante ao TCP original. Já o TCP SACK obteve pouco ganho em relação ao TCP padrão, e em redes onde a taxa de erro não é muito elevada (10^{-5} e 10^{-4}). Foi inferior aos outros protocolos, como TCP Westwood, *snoop* e *snoop otimizado* em todos os testes, independente da taxa de erro.

Quando inserimos mais uma variável no ambiente de rede *wireless*, o *handoff*, o *snoop otimizado* continuou sendo superior em todos os testes. Se a desconexão for muita elevada, a perda de segmentos aumenta muito e a solução proposta tem o desempenho muito próximo ao *snoop*, apesar de ambos terem uma vazão melhor que o TCP Reno.

O *buffer* do AP é um fator muito importante, pois ele define os segmentos que podem ser retransmitidos. Se ele for pequeno, pode ser um gargalo na solução, e conseqüentemente, na retransmissão. O limite para o tamanho do *buffer* é apenas de hardware. Quanto mais for armazenado, maior será a probabilidade do segmento perdido ser retransmitido no ponto de acesso (AP).

7. Considerações finais

A perda de desempenho do TCP sobre redes heterogêneas foi estudada em detalhes, mostrando que o principal problema é a ativação do controle de congestionamento pelo TCP, quando ocorre alguma perda na rede, independente de sua causa. Assim, se o TCP estiver sendo utilizado em uma rede *wireless*, onde a taxa de erro é elevada e ocorrem freqüentes desconexões (*handoffs*), se ocorrer alguma perda de segmento, sua taxa de transmissão é reduzida pois ele supõe que ocorreu algum congestionamento, e na verdade, são problemas devido à mobilidade e a taxa de erro das redes *wireless*.

O objetivo principal deste *paper* foi estudar detalhadamente o problema da redução do desempenho do protocolo TCP sobre as redes heterogêneas e propor uma solução para minimizá-lo. Para tanto, foi analisado com os principais mecanismos do protocolo TCP, mostrado as características das redes *wireless* 802.11, estudado e comparado os principais trabalhos relacionados com o tema e desenvolvido e validado uma proposta, o *snoop otimizado*, para resolver o problema.

De maneira geral, os resultados dos testes com o simulador *ns2* mostraram que a solução proposta do *snoop otimizado* tem um desempenho superior aos outros protocolos, se a taxa de erro na

rede *wireless* variar de 10^{-3} a 10^{-6} , os períodos de *handoff* forem aproximadamente de 2 ou 5 segundos, o RTT da rede *wireless* for de 20 ms e o fluxo de dados for do FH para o MH, como uma rede típica corporativa, com servidores na rede *wired* e os clientes na rede *wireless*. Como estes são parâmetros típicos de uma rede heterogênea, a solução do **snoop otimizado** foi testada em cenário muito próximo a realidade e mostrou que, quando implementada em equipamentos de uma rede heterogênea real, terá um desempenho melhor que as outras soluções.

O problema das longas desconexões poderia ser melhorado ainda mais, se o **snoop otimizado** fosse associado com algum outro mecanismo, que trate de desconexões, como o *Freeze-TCP*. Neste protocolo, antes do MH se desconectar, ele envia um sinal de ZWA (*Zero Window Advertisement*) que reduz a zero a janela de congestionamento do TCP. Quando ele se reconecta ao AP, é restabelecida a conexão com a mesma vazão anterior, sem a ativação do controle de congestionamento pelo transmissor. Na integração dos dois protocolos, **snoop otimizado** e *Freeze-TCP*, o ponto de acesso (AP), como monitora o MH periodicamente através dos ACKs, pode enviar o ZWA para o FH, assim que um MH se desconectar, evitando a ativação do controle de congestionamento.

8. Referências bibliográficas

- [ANN01] ANNAMALAI, N.; BALAKRISHNAN, L.; KUMARASAMY, V. **TCP for Wireless Networks**; Dallas, 2001. Disponível em: <HTTP://citeseer.nj.nec.com/481280.html>. Acesso em: Maio, 2003.
- [ANSI99] ANSI/IEEE Standard 802.11, **Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications**, 1999.
- [BAK94] BAKRE, A.; BADRINATH, B. R. I-TCP: indirect TCP for mobile hosts. **Technical Report TR-314**, Dept. Comp. Sci., Rutgers University, 1994.
- [BAL97] BALAKEISHNAN, H.; PADMANABHAN, V. N.; SESHAN, S.; KATZ, R. H. A Comparison of Mechanisms for Improving TCP Performance over *Wireless* Links. **IEEE/ACM Transactions on networking**, p. 756-769, Dez. 1997
- [BAL95] Balakrishnan, H.; Seshan, S.; Katz, R. H. Improving Reliable Transport and *Handoff* Performance in Cellular *Wireless* Networks. **ACM Wireless Networks**, v.1, n.4, p.469-482, Dez. 1995.
- [BRA89] BRADEN, J. RFC 1122 Requirements for Internet Hosts - Communication Layers. **Internet Engineering Task Force**, Out. 1989. Disponível em: <HTTP://www.ietf.org/rfc/rfc1122.txt>. Acesso em: Maio, 2003.
- [CAS02] CASSETI, C.; GERLA, M.; MASCOLO S. SANADIDI, M. TCP Westwood: Bandwidth Estimation for Enhanced Transport over *Wireless* Links. **ACM Wireless Networks**, n.8, p.467-479, 2002.
- [COM95] COMER, D. E.; **Internetworking with TCP/IP**. Prentice, Hall, v.1, p.199-253, 1995.
- [GEI02] GEIER, J. **Wireless LANS: Implementing High Performance IEEE 802.11 Networks**. 2.ed., p.5-125, SAMS, 2002.
- [GOF00] GOFF, T.; MORONSKI, J.; PHATAK, D.S. Freeze-TCP: A true end-to-end TCP enhancement mechanism for mobile environments. **Proceedings of the IEEE INFOCOM**, p.1537-1545, 2000
- [JAC89] JACOBSON, V.; LERES, C.; MCCANNE, S.; **TCPDUMP Public Repository** [online]. 1989. Disponível em: <HTTP://www.tcpdump.org/>. Acesso em: Maio, 2003.
- [JAC92] JACOBSON V., BRADEN R., BORMAN D. RFC 1323, TCP Extensions for High Performance. **Internet Engineering Task Force**, May 1992. Disponível em: <HTTP://www.ietf.org/rfc/rfc1323.txt>. Acesso em: Maio, 2003.
- [PAH02] PAHLAVAN, K.; KRISHNAMURT, P. **Principles of Wireless Networks**. Prentice Hall PTR, 2002.

- [PAT01] PATEL, M.; TANNA, N. B. R. **TCP over *Wireless* Networks**: Issues, Challenges and Survey of Solutions. Nov. 20001. Disponível em: <[HTTP://citeseer.nj.nec.com/489782.html](http://citeseer.nj.nec.com/489782.html)>. Acesso em: Maio, 2003.
- [PEN00] PENTIKOUSIS, K.; TCP in *Wired-cum-Wireless* Environments, **IEEE Communications Surveys**, v.3, n.4, 2000.
- [POS81] POSTEL, J. RFC 793 Transmission Control Protocol. **Internet Engineering Task Force**, Set. 1981. Disponível em: <[HTTP://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt](http://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt)>. Acesso em: 11º Maio de 2003.
- [SIN02] SINHA, P.; VENKITARAMAN, N.; SIVAKUMAR, R.; BHARGHAVAN, H. WTCP: A Reliable Transport Protocol for *Wireless* Wide-Area Networks. **Wireless Networks**, v.8 n.2/3, p.301-316, Maio 2002.
- [STA97] STALLINGS, W; **Local & Metropolitan Area Networks**. Prentice Hall, p.355-384, 1997.
- [STA98] STALLINGS, W.; **High-Speed Networking: TCP/IP and ATM Design Principles**. Prentice Hall, p.239-296, 1998.
- [TAN96] TANENBAUM, A. S.; **Computer Network**. Prentice Hall, 3.ed., p.479-572, 1996.
- [VIN95] VINT Group, UCB/LBNL/VINT, **The Network Simulator (ns)**, versão 2, 1995. Disponível em: <[HTTP://www.isi.edu/nsnam/ns](http://www.isi.edu/nsnam/ns)>. Acesso em: 1º Maio de 2003.

Tabela 4.1 – Comparação dos protocolos analisados

Crítérios	SNOOP	ECN EBSN ELN	Múltiplo ACK	I-TCP	Freeze- TCP	WTCP	M-TCP	TCP SACK	TCP Westwood	Fast Retransmission
Necessita Nó Intermediário	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Semântica Fim-a-Fim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Suporta Períodos Longos de Desconexões	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Suporta Frequentes Desconexões	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Controla Altas Taxas de Erro	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Altera Código - <i>Wired</i> (FH)	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Não
Altera Código - AP	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Altera Código - <i>Wireless</i> (MH)	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Suporta Encriptação (IPSec)	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Custo Implementação	Baixo	Alto	Alto	Médio	Baixo	Alto	Alto	Médio	Alto	Baixo
Nível de Alteração	Rede	Transp.	Transp.	Transporte	Transporte	Transporte	Transp.	Transporte	Transp.	Transporte

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PCS/9301 - Interligação de Processadores através de Chaves Ômicron - GERALDO LINO DE CAMPOS, DEMI GETSCHKO
- BT/PCS/9302 - Implementação de Transparência em Sistema Distribuído - LUÍSA YUMIKO AKAO, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/9303 - Desenvolvimento de Sistemas Especificados em SDL - SIDNEI H. TANO, SELMA S. S. MELNIKOFF
- BT/PCS/9304 - Um Modelo Formal para Sistemas Digitais à Nível de Transferência de Registradores - JOSÉ EDUARDO MOREIRA, WILSON VICENTE RUGGIERO
- BT/PCS/9305 - Uma Ferramenta para o Desenvolvimento de Protótipos de Programas Concorrentes - JORGE KINOSHITA, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/9306 - Uma Ferramenta de Monitoração para um Núcleo de Resolução Distribuída de Problemas Orientado a Objetos - JAIME SIMÃO SICHMAN, ELERI CARDOSO
- BT/PCS/9307 - Uma Análise das Técnicas Reversíveis de Compressão de Dados - MÁRIO CESAR GOMES SEGURA, EDIT GRASSIANI LINO DE CAMPOS
- BT/PCS/9308 - Proposta de Rede Digital de Sistemas Integrados para Navio - CESAR DE ALVARENGA JACOBY, MOACYR MARTUCCI JR.
- BT/PCS/9309 - Sistemas UNIX para Tempo Real - PAULO CESAR CORIGLIANO, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/9310 - Projeto de uma Unidade de Matching Store baseada em Memória Paginada para uma Máquina Fluxo de Dados Distribuído - EDUARDO MARQUES, CLAUDIO KIRNER
- BT/PCS/9401 - Implementação de Arquiteturas Abertas: Uma Aplicação na Automação da Manufatura - JORGE LUIS RISCO BECERRA, MOACYR MARTUCCI JR.
- BT/PCS/9402 - Modelamento Geométrico usando do Operadores Topológicos de Euler - GERALDO MACIEL DA FONSECA, MARIA ALICE GRIGAS VARELLA FERREIRA
- BT/PCS/9403 - Segmentação de Imagens aplicada a Reconhecimento Automático de Alvos - LEONCIO CLARO DE BARROS NETO, ANTONIO MARCOS DE AGUIRRA MASSOLA
- BT/PCS/9404 - Metodologia e Ambiente para Reutilização de Software Baseado em Composição - LEONARDO PUJATTI, MARIA ALICE GRIGAS VARELLA FERREIRA
- BT/PCS/9405 - Desenvolvimento de uma Solução para a Supervisão e Integração de Células de Manufatura Discreta - JOSÉ BENEDITO DE ALMEIDA, JOSÉ SIDNEI COLOMBO MARTINI
- BT/PCS/9406 - Método de Teste de Sincronização para Programas em ADA - EDUARDO T. MATSUDA, SELMA SHIN SHIMIZU MELNIKOFF
- BT/PCS/9407 - Um Compilador Paralelizante com Detecção de Paralelismo na Linguagem Intermediária - HSUEH TSUNG HSIANG, LÍRIA MATSUMOTO SAITO
- BT/PCS/9408 - Modelamento de Sistemas com Redes de Petri Interpretadas - CARLOS ALBERTO SANGIORGIO, WILSON V. RUGGIERO
- BT/PCS/9501 - Síntese de Voz com Qualidade - EVANDRO BACCI GOUVÊA, GERALDO LINO DE CAMPOS
- BT/PCS/9502 - Um Simulador de Arquiteturas de Computadores "A Computer Architecture Simulator" - CLAUDIO A. PRADO, WILSON V. RUGGIERO
- BT/PCS/9503 - Simulador para Avaliação da Confiabilidade de Sistemas Redundantes com Reparo - ANDRÉA LUCIA BRAGA, FRANCISCO JOSÉ DE OLIVEIRA DIAS
- BT/PCS/9504 - Projeto Conceitual e Projeto Básico do Nível de Coordenação de um Sistema Aberto de Automação, Utilizando Conceitos de Orientação a Objetos - NELSON TANOMARU, MOACYR MARTUCCI JUNIOR
- BT/PCS/9505 - Uma Experiência no Gerenciamento da Produção de Software - RICARDO LUIS DE AZEVEDO DA ROCHA, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/9506 - Método OO - Método de Desenvolvimento de Sistemas Orientado a Objetos: Uma Abordagem Integrada à Análise Estruturada e Redes de Petri - KECHI HIRAMA, SELMA SHIN SHIMIZU MELNIKOFF
- BT/PCS/9601 - MOOPP: Uma Metodologia Orientada a Objetos para Desenvolvimento de Software para Processamento Paralelo - ELISA HATSUE MORIYA HUZITA, LÍRIA MATSUMOTO SATO
- BT/PCS/9602 - Estudo do Espalhamento Brillouin Estimulado em Fibras Ópticas Monomodo - LUIS MEREGE SANCHES, CHARLES ARTUR SANTOS DE OLIVEIRA
- BT/PCS/9603 - Programação Paralela com Variáveis Compartilhadas para Sistemas Distribuídos - LUCIANA BEZERRA ARANTES, LÍRIA MATSUMOTO SATO
- BT/PCS/9604 - Uma Metodologia de Projeto de Redes Locais - TEREZA CRISTINA MELO DE BRITO CARVALHO, WILSON VICENTE RUGGIERO

- BT/PCS/9605 - Desenvolvimento de Sistema para Conversão de Textos em Fonemas no Idioma Português - DIMAS TREVIZAN CHBANE, GERALDO LINO DE CAMPOS
- BT/PCS/9606 - Sincronização de Fluxos Multimídia em um Sistema de Videoconferência - EDUARDO S. C. TAKAHASHI, STEFANIA STIUBIENER
- BT/PCS/9607 - A importância da Completeza na Especificação de Sistemas de Segurança - JOÃO BATISTA CAMARGO JÚNIOR, BENICIO JOSÉ DE SOUZA
- BT/PCS/9608 - Uma Abordagem Paraconsistente Baseada em Lógica Evidencial para Tratar Exceções em Sistemas de Frames com Múltipla Herança - BRÁULIO COELHO ÁVILA, MÁRCIO RILLO
- BT/PCS/9609 - Implementação de Engenharia Simultânea - MARCIO MOREIRA DA SILVA, MOACYR MARTUCCI JÚNIOR
- BT/PCS/9610 - Statecharts Adaptativos - Um Exemplo de Aplicação do STAD - JORGE RADY DE ALMEIDA JUNIOR, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/9611 - Um Meta-Editor Dirigido por Sintaxe - MARGARETE KEIKO IWAI, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/9612 - Reutilização em Software Orientado a Objetos: Um Estudo Empírico para Analisar a Dificuldade de Localização e Entendimento de Classes - SELMA SHIN SHIMIZU MELNIKOFF, PEDRO ALEXANDRE DE OLIVEIRA GIOVANI
- BT/PCS/9613 - Representação de Estruturas de Conhecimento em Sistemas de Banco de Dados - JUDITH PAVÓN MENDONZA, EDIT GRASSIANI LINO DE CAMPOS
- BT/PCS/9701 - Uma Experiência na Construção de um Tradutor Inglês - Português - JORGE KINOSHITA, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/9702 - Combinando Análise de "Wavelet" e Análise Entrópica para Avaliar os Fenômenos de Difusão e Correlação - RUI CHUO HUEI CHIOU, MARIA ALICE G. V. FERREIRA
- BT/PCS/9703 - Um Método para Desenvolvimento de Sistemas de Computacionais de Apoio a Projetos de Engenharia - JOSÉ EDUARDO ZINDEL DEBONI, JOSÉ SIDNEI COLOMBO MARTINI
- BT/PCS/9704 - O Sistema de Posicionamento Global (GPS) e suas Aplicações - SÉRGIO MIRANDA PAZ, CARLOS EDUARDO CUGNASCA
- BT/PCS/9705 - METAMBI-OO - Um Ambiente de Apoio ao Aprendizado da Técnica Orientada a Objetos - JOÃO UMBERTO FURQUIM DE SOUZA, SELMA S. S. MELNIKOFF
- BT/PCS/9706 - Um Ambiente Interativo para Visualização do Comportamento Dinâmico de Algoritmos - IZAURA CRISTINA ARAÚJO, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/9707 - Metodologia Orientada a Objetos e sua Aplicação em Sistemas de CAD Baseado em "Features" - CARLOS CÉSAR TANAKA, MARIA ALICE GRIGAS VARELLA FERREIRA
- BT/PCS/9708 - Um Tutor Inteligente para Análise Orientada a Objetos - MARIA EMÍLIA GOMES SOBRAL, MARIA ALICE GRIGAS VARELLA FERREIRA
- BT/PCS/9709 - Metodologia para Seleção de Solução de Sistema de Aquisição de Dados para Aplicações de Pequeno Porte - MARCELO FINGUERMAN, JOSÉ SIDNEI COLOMBO MARTINI
- BT/PCS/9801 - Conexões Virtuais em Redes ATM e Escalabilidade de Sistemas de Transmissão de Dados sem Conexão - WAGNER LUIZ ZUCCHI, WILSON VICENTE RUGGIERO
- BT/PCS/9802 - Estudo Comparativo dos Sistemas da Qualidade - EDISON SPINA, MOACYR MARTUCCI JR.
- BT/PCS/9803 - The VIBRA Multi-Agent Architecture: Integrating Purposive Vision With Deliberative and Reactive Planning - REINALDO A. C. BIANCHI, ANNA H. REALI C. RILLO, LELIANE N. BARROS
- BT/PCS/9901 - Metodologia ODP para o Desenvolvimento de Sistemas Abertos de Automação - JORGE LUIS RISCO BECCERRA, MOACYR MARTUCCI JUNIOR
- BT/PCS/9902 - Especificação de Um Modelo de Dados Bitemporal Orientado a Objetos - SOLANGE NICE ALVES DE SOUZA, EDIT GRASSIANI LINO DE CAMPOS
- BT/PCS/9903 - Implementação Paralela Distribuída da Dissecção Cartesiana Aninhada - HILTON GARCIA FERNANDES, LIRIA MATSUMOTO SATO
- BT/PCS/9904 - Metodologia para Especificação e Implementação de Solução de Gerenciamento - SERGIO CLEMENTE, TEREZA CRISTINA MELO DE BRITO CARVALHO
- BT/PCS/9905 - Modelagem de Ferramenta Hipermídia Aberta para a Produção de Tutoriais Interativos - LEILA HYODO, ROMERO TORI
- BT/PCS/9906 - Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de Anotação com Dois Valores-LPA2v com Construção de Algoritmo e Implementação de Circuitos Eletrônicos - JOÃO I. DA SILVA FILHO, JAIR MINORO ABE
- BT/PCS/9907 - Modelo Nebuloso de Confiabilidade Baseado no Modelo de Markov - PAULO SÉRGIO CUGNASCA, MARCO TÚLIO CARVALHO DE ANDRADE
- BT/PCS/9908 - Uma Análise Comparativa do Fluxo de Mensagens entre os Modelos da Rede Contractual (RC) e Colisões Baseada em Dependências (CBD) - MÁRCIA ITO, JAIME SIMÃO SICHMAN
- BT/PCS/9909 - Otimização de Processo de Inserção Automática de Componentes Eletrônicos Empregando a Técnica de Times Assíncronos - CESAR SCARPINI RABAK, JAIME SIMÃO SICHMAN

- BT/PCS/9910 – MIISA – Uma Metodologia para Integração da Informação em Sistemas Abertos – HILDA CARVALHO DE OLIVEIRA, SELMA S. S. MELNIKOFF
- BT/PCS/9911 – Metodologia para Utilização de Componentes de Software: um estudo de Caso – KAZUTOSI TAKATA, SELMA S. S. MELNIKOFF
- BT/PCS/0001 – Método para Engenharia de Requisitos Norteados por Necessidades de Informação – ARISTIDES NOVELLI FILHO, MARIA ALICE GRIGAS VARELLA FERREIRA
- BT/PCS/0002 – Um Método de Escolha Automática de Soluções Usando Tecnologia Adaptativa – RICARDO LUIS DE AZEVEDO DA ROCHA, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/0101 – Gerenciamento Hierárquico de Falhas – JAMIL KALIL NAUFAL JR., JOÃO BATISTA CAMARGO JR.
- BT/PCS/0102 – Um Método para a Construção de Analisadores Morfológicos, Aplicado à Língua Portuguesa, Baseado em Autômatos Adaptativos – CARLOS EDUARDO DANTAS DE MENEZES, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/0103 – Educação pela Web: Metodologia e Ferramenta de Elaboração de Cursos com Navegação Dinâmica – LUISA ALEYDA GARCIA GONZÁLEZ, WILSON VICENTE RUGGIERO
- BT/PCS/0104 – O Desenvolvimento de Sistemas Baseados em Componentes a Partir da Visão de Objetos – RENATA EVANGELISTA ROMARIZ RECCO, JOÃO BATISTA CAMARGO JÚNIOR
- BT/PCS/0105 – Introdução às Gramáticas Adaptativas – MARGARETE KEIKO IWAI, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/0106 – Automação dos Processos de Controle de Qualidade da Água e Esgoto em Laboratório de Controle Sanitário – JOSÉ BENEDITO DE ALMEIDA, JOSÉ SIDNEI COLOMBO MARTINI
- BT/PCS/0107 – Um Mecanismo para Distribuição Segura de Vídeo MPEG – CÍNTIA BORGES MARGI, GRAÇA BESSAN, WILSON VICENTE RUGGIERO
- BT/PCS/0108 – A Dependence-Based Model for Social Reasoning in Multi-Agent Systems – JAIME SIMÃO SICHMAN
- BT/PCS/0109 – Ambiente Multilíngua de Programação – Aspectos do Projeto e Implementação – APARECIDO VALDEMIR DE FREITAS, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/0110 – LETAC: Técnica para Análise de Tarefas e Especificação de Fluxo de Trabalho Cooperativo – MARCOS ROBERTO GREINER, LUCIA VILELA LEITE FILGUEIRAS
- BT/PCS/0111 – Modelagem ODP para o Planejamento de Sistemas de Potência – ANÍRIO SALLES FILHO, JOSÉ SIDNEI COLOMBO MARTINI
- BT/PCS/0112 – Técnica para Ajuste dos Coeficientes de Quantização do Padrão MPEG em Tempo Real – REGINA M. SILVEIRA, WILSON V. RUGGIERO
- BT/PCS/0113 – Segmentação de Imagens por Classificação de Cores: Uma Abordagem Neural – ALEXANDRE S. SIMÕES, ANNA REALI COSTA
- BT/PCS/0114 – Uma Avaliação do Sistema DSM Nautilus – MARIO DONATO MARINO, GERALDO LINO DE CAMPOS
- BT/PCS/0115 – Utilização de Redes Neurais Artificiais para Construção de Imagem em Câmara de Cintilação – LUIZ SÉRGIO DE SOUZA, EDITH RANZINI
- BT/PCS/0116 – Simulação de Redes ATM – HSU CHIH WANG CHANG, WILSON VICENTE RUGGIERO
- BT/PCS/0117 – Application of Monoprocessed Architecture for Safety Critical Control Systems – JOSÉ ANTONIO FONSECA, JORGE RADY DE ALMEIDA JR.
- BT/PCS/0118 – WebBee – Um Sistema de Informação via WEB para Pesquisa de Abelhas sem Ferrão – RENATO SOUSA DA CUNHA, ANTONIO MOURA SARAIVA
- BT/PCS/0119 – Parallel Processing Applied to Robot Manipulator Trajectory Planning – DENIS HAMILTON NOMIYAMA, LÍRIA MATSUMOTO SATO, ANDRÉ RIYUITI HIRAKAWA
- BT/PCS/0120 – Utilização de Padrão de Arquitetura de Software para a Fase de Projeto Orientado a Objetos – CRISTINA MARIA FERREIRA DA SILVA, SELMA SHIN SHIMIZU MELNIKOFF
- BT/PCS/0121 – Agilizando Aprendizagem por Reforço Através do uso de Conhecimento sobre o Domínio – RENÊ PEGORARO, ANNA H. REALI COSTA
- BT/PCS/0122 – Modelo de Segurança da Linguagem Java Problemas e Soluções – CLAUDIO MASSANORI MATAYOSHI, WILSON VICENTE RUGGIERO
- BT/PCS/0123 – Proposta de um Agente CNM para o Gerenciamento Web de um Backbone ATM – FERNANDO FROTA REDÍGOLO, TEREZA CRISTINA MELO DE BRITO CARVALHO
- BT/PCS/0124 – Um Método de Teste de software Baseado em Casos Teste – SÉRGIO RICARDO ROTTA, KECHI HIRAMA
- BT/PCS/0201 – A Teoria Nebulosa Aplicada a uma Bicicleta Ergométrica para Fisioterapia – MARCO ANTONIO GARMS, MARCO TÚLIO CARVALHO DE ANDRADE
- BT/PCS/0202 – Synchronization Constraints in a Concurrent Object Oriented Programming Model – LAÍS DO NASCIMENTO SALVADOR, LÍRIA MATSUMOTO SATO
- BT/PCS/0203 – Construção de um Ambiente de Dados sobre um Sistema de Arquivos Paralelos – JOSÉ CRAVEIRO DA COSTA NETO, LÍRIA MATSUMOTO SATO

- BT/PCS/0204 – Maestro: Um Middleware para Suporte a Aplicações Distribuídas Baseadas em Componentes de Software – CLÁUDIO LUÍS PEREIRA FERREIRA, JORGÉ LUÍS RISCO BECERRA
- BT/PCS/0205 – Sistemas de Automação dos Transportes (ITS) Descritos Através das Técnicas de Modelagem RM-OPD (ITU-T) e UML (OMG) – CLÁUDIO LUIZ MARTE, JORGE LUÍS RISCO BECERRA, JOSÉ SIDNEI COLOMBO
- BT/PCS/0206 – Comparação de Perfis de Usuários Coletados Através do Agente de Interface PersonalSearcher – GUSTAVO A. GIMÉNEZ LUGO, ANALÍA AMANDI, JAIME SIMÃO SICHMAN
- BT/PCS/0207 – Arquitetura Reutilizáveis para a Criação de Sistemas de Tutorização Inteligentes – MARCO ANTONIO FURLAN DE SOUZA, MARIA ALICE GRIGAS VARELLA FERREIRA
- BT/PCS/0208 – Análise e Predição de Desempenho de Programas Paralelos em Redes de Estações de Trabalho – LIN KUAN CHING, LIRIA MATSUMOTO SATO
- BT/PCS/0209 – Previsões Financeiras Através de Sistemas Neuronebulosos – DANIEL DE SOUZA GOMES, MARCO TÚLIO CARVALHO DE ANDRADE
- BT/PCS/0210 – Proposta de Arquitetura Aberta de Central de Atendimento – ANA PAULA GONÇALVES SERRA, MOACYR MARTUCCI JÚNIOR
- BT/PCS/0211 – Alternativas de Implementação de Sistemas Nebulosos em Hardware – MARCOS ALVES PREDEBON, MARCO TÚLIO CARVALHO DE ANDRADE
- BT/PCS/0212 – Registro de Imagens de Documentos Antigos – VALGUIMA VICTORIA VIANA ODAKURA MARTINEZ, GERALDO LINO DE CAMPOS
- BT/PCS/0213 – Um Modelo de Dados Multidimensional – PEDRO WILLEMSSENS, JORGE RADY DE ALMEIDA JUNIOR
- BT/PCS/0214 – Autômatos Adaptativos no Tratamento Sintático de Linguagem Natural – CÉLIA YUMI OKANO TANIWAKI, JOÃO JOSÉ NETO
- BT/PCS/0215 – Fatores e Subfatores para Avaliação da Segurança em Software de Sistemas Críticos – JOÃO EDUARDO PROENÇA PÁSCOA, JOÃO BATISTA CAMARGO JÚNIOR
- BT/PCS/0216 – Derivando um Modelo de Projeto a Partir de um Modelo de Análise, com Base em Design Patterns J2EE – SERGIO MARTINS FERNANDES, SELMA SHIN SHIMIZU MELNIKOFF
- BT/PCS/0217 – Domínios Virtuais para Redes Móveis Ad Hoc: Um Mecanismo de Segurança – LEONARDO AUGUSTO MARTUCCI, TEREZA CRISTINA DE MELO BRITO CARVALHO
- BT/PCS/0218 – Uma Ferramenta para a Formulação de Consultas Baseadas em Entidades e Papéis – ANDRÉ ROBERTO DORETO SANTOS, EDIT GRASSIANI LINO CAMPOS
- BT/PCS/0219 – Avaliação de Performance de Arquiteturas para Computação de Alto Desempenho – KARIN STRAUSS, WILSON VICENTE RUGGIERO
- BT/PCS/0220 – BGLsim: Simulador de Sistema Completo para o Blue Gene/L – LUÍS HENRIQUE DE BARROS CEZE, WILSON VICENTE RUGGIERO
- BT/PCS/0221 – μ P: Uma Solução de Micropagamentos – PEDRO ANCONA LOPEZ MINDLIN, TEREZA CRISTINA MELO DE BRITO CARVALHO
- BT/PCS/0222 – Modelamento de Roteadores IP para Análise de Atraso – MARCELO BLANÉS, GRAÇA BRESSAN
- BT/PCS/0223 – Uma Biblioteca de Classes Utilizando Java 3D para o Desenvolvimento de Ambientes Virtuais Multi-Usuários – RICARDO NAKAMURA, ROMERO TORI
- BT/PCS/0224 – Interactive 3D Physics Experiments Through the Internet – ALEXANDRE CARDOSO, ROMERO TORI
- BT/PCS/0225 – Avaliação do Desempenho de Aplicações Distribuídas sob Duas Velocidades de Rede – AMILCAR ROSA PEREIRA, GERALDO LINO DE CAMPOS
- BT/PCS/0226 – Acompanhamento do Aprendizado do Aluno em Cursos a Distância através da WEB: Metodologias e Ferramentas – LUCIANA APARECIDA MARTINEZ ZAINA, GRAÇA BRESSAN
- BT/PCS/0227 – Um Ambiente Colaborativo para Simulação de Redes de Computadores – OSCAR DANTAS VILCACHAGUA, GRAÇA BRESSAN
- BT/PCS/0301 – Diretrizes para o Projeto de Base de Dados Distribuídas – PEDRO LUIZ PIZZIGATTI CORRÊA, JORGE RADY DE ALMEIDA JR.
- BT/PCS/0302 – Análise e Predição de Desempenho de Programas MPI em Redes de Estações de Trabalho – JEAN MARCOS LAINE, EDSON T. MIDORIKAWA
- BT/PCS/0303 – Padrões de Software para Tutores Inteligentes Cooperativos em Engenharia de Requisitos – MARIA EMILIA GOMES SOBRAL, MARIA ALICE GRIGAS VARELLA FERREIRA
- BT/PCS/0304 – Performance Analysis and Prediction of Some MPI Communication Primitives – HÉLIO MARCI DE OLIVEIRA, EDSON TOSHIMI MIDORIKAWA
-
- BT/PCS/0305 – RM-ODP para Expressar o Licenciamento Nuclear – EDILSON DE ANDRADE BARBOSA, MOACYR MARTUCCI JÚNIOR
- BT/PCS/0306 – Modelo de Avaliação para Métricas de Software – VINICIUS DA SILVA ALMENDRA, KECHI HIRAMA

- BT/PCS/0307 – Análise de Confiabilidade de Sistemas Redundantes de Armazenamento em Discos Magnéticos – ENDERSON FERREIRA, JORGE RADY DE ALMEIDA JUNIOR
- BT/PCS/0308 – Utilizando Realidade Virtual e Objetos Distribuídos na Construção de uma Ferramenta de Aprendizagem Colaborativa – O Projeto Piaget – ISMAR FRANGO SILVEIRA, MARIA ALICE GRIGAS VARELLA FERREIRA
- BT/PCS/0309 – Construção de Base de Conhecimento em Prolog a partir de Páginas HTML – WAGNER TOSCANO, EDSON SATOSHI GOMI
- BT/PCS/0310 – Verificação de Segurança em Confluência de Trajetórias de Aeronaves Utilizando Autômatos Híbridos – ÍTALO ROMANI DE OLIVEIRA, PAULO SÉRGIO CUGNASCA
- BT/PCS/0311 – Sistemas de Reconhecimento Biométrico Aplicados à Segurança de Sistemas de Informação – VILMAR DE SOUZA MACHADO, JORGE RADY DE ALMEIDA JUNIOR
- BT/PCS/0312 – Análise Comparativa de Arquiteturas Híbridas Intserv-Diffserv Utilizadas para Obtenção de QoS Fim-a-Fim em Redes IP – CARLOS A. A. BENITES, GRAÇA BRESSAN

