

Um modelo para controle de erros usando ARQ e FEC em redes ATM sem fio

Rejane C. Freitas, José A. Suruagy Monteiro

Departamento de Ciências Exatas – UESB

Centro de Informática – UFPE

rcf2@cin.ufpe.br

NUPERC

Universidade Salvador – UNIFACS

suruagy@unifacs.br

Resumo

O crescimento da telefonia móvel associada à utilização de aplicações multimídia tem levado à necessidade de se garantir a mesma qualidade de serviço encontrada nas redes ATM fixas também para os terminais móveis. Nos estudos sobre o ATM sem fio, têm sido propostas soluções com o objetivo de obter uma transmissão mais confiável. Isto no meio onde a qualidade do canal varia em função dos desvanecimentos do sinal, como é o caso do canal de rádio. Este artigo apresenta um modelo para controle de erro usando ARQ (*Automatic Repeat Request*) com retransmissão seletiva e FEC (*Forward Error Correction*) no intuito de melhorar o desempenho na transmissão em um enlace ATM sem fio. É avaliado o comportamento das taxas de perda de células para o modelo variando-se alguns parâmetros importantes como o número máximo de retransmissões e a taxa de codificação do FEC. Considerou-se nos estudos tráfego com dependência de curto e de longo alcance.

Palavras chave: Comunicação sem fio, ATM , códigos corretores de erro, largura de banda.

Abstract

The fast deployment of mobile phones together with the utilization of multimedia applications rise the need to grant the same level of Quality of Service found in cabled networks to mobile terminals. In wireless ATM studies solutions have been proposed with the objective of obtaining a better transmission. And such in a environment where channel quality varies according to signal fading, like radio channels. This paper presents a model for error control using ARQ (*Automatic Repeat Request*) with selective repeat and FEC (*Forward Error Correction*) aiming at improving transmission performance in wireless ATM links. Cell loss rate behavior is evaluated for the performance model varying some important parameters such as the maximum retransmission number and FEC's codification rate. In this study, short and long range dependent traffic were considered.

1 Introdução

Duas tendências podem ser identificadas no campo das telecomunicações hoje. Uma evolução no sentido das redes fixas de banda larga e o avanço da comunicação sem fio. A tendência seguinte, que já começa a ser observada, é a da união destas duas linhas de desenvolvimento.

O modo de transferência assíncrono ou ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), escolhido pelo ITU-T (*International Telecommunication Union - Telecommunications Standardization Sector*) como técnica de transmissão para a Rede Digital de Serviços Integrados de Faixa Larga (RDSI-FL), está atualmente tendo uma boa aceitação em redes de banda larga. Em função disso, algumas arquiteturas foram propostas no sentido de possibilitar sua interoperação com outros tipos de rede, entre elas *Emulação de LANs sobre ATM* [AKY97] e *IP sobre ATM* [ATK94, LAU94]. O destino da tecnologia ATM e do RDSI-FL depende em grande parte de aspectos comerciais como a disponibilidade de equipamentos a preços razoáveis, o interesse dos consumidores nos novos serviços e o custo de manutenção e atualização dos sistemas existentes. Contudo, espera-se que o ATM tenha um papel importante no futuro das telecomunicações.

Por outro lado, uma grande revolução foi causada nas telecomunicações pela introdução dos sistemas móveis de segunda geração, traduzindo-se em um rápido crescimento da telefonia móvel. Isto gerou uma demanda por diferentes tipos de serviços, como aplicações multimídia, Internet, etc., onde são necessárias taxas mais altas de transmissão e garantia de qualidade do serviço. Outras soluções então se fazem necessárias. Os sistemas de terceira geração como, por exemplo, o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [ETS98], indicado como o sucessor do sistema de telefonia móvel existente, pretendem oferecer maior largura de banda que seus antecessores. Ainda assim, não serão capazes de atender às necessidades de usuários habituados aos recursos que uma rede com tecnologia ATM pode oferecer. Um novo tipo de sistema é necessário para oferecer uma comunicação sem fio com nível de desempenho semelhante.

Estes novos sistemas deverão oferecer acesso a redes ATM convencionais com uma qualidade quase tão boa quanto o óptico. Espera-se que a tecnologia ATM fixa seja usada para implementar redes locais (LANs) inicialmente, e que o passo posterior seja a introdução das LANs ATM sem fio. Um sistema sem fio ATM poderia estender os serviços RDSI-FL aos usuários móveis. Os benefícios obtidos com a adaptação do ATM para o meio sem fio devem justificar a complexidade introduzida.

O conceito de ATM sem fio foi proposto inicialmente por Raychaudhuri e Wilson [RAY92]. A viabilidade do ATM sem fio tem sido estudada de forma experimental em várias pesquisas [RAY94, ENG95, POR95], demonstrando que é possível oferecer qualidade de serviço de banda larga para dispositivos multimídia móveis [RAY97]. Desde então, o interesse técnico e comercial pela tecnologia ATM sem fio tem estimulado a formação de grupos de padronização, como o WAG (*Wireless ATM Group*) do Fórum ATM [RAU97] e o BRAN (*Broadband Radio Access Networks*) do ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) [ETS97].

As dificuldades técnicas para a implementação do ATM sem fio estão relacionadas à compatibilização da pilha de protocolos ATM convencional ao meio sem fio. Algumas destas dificuldades estão relacionadas a seguir [MAR97]:

- Capacidade de transmissão limitada nos canais de rádio;
- Taxa elevada de bits com erro nos enlaces sem fio e necessidade de um controle de erros sobre as informações transmitidas;
- Necessidade de um mecanismo de controle de acesso ao meio;
- A qualidade de serviço negociada para uma conexão pode não mais ser satisfeita;
- Associação entre mobilidade e uma tecnologia orientada a conexão;
- O meio sem fio requer camadas adicionais de protocolos de controle, o que gera um *overhead* extra no pacote e resulta na redução da eficiência do uso do canal sem fio.

Os erros são resultado dos chamados desvanecimentos (*fading*) do sinal em canais de rádio. O problema é que o ATM foi projetado com a suposição de enlaces de dados de alta qualidade. Isto é verdade não apenas para ATM, mas também para o protocolo TCP, o qual é freqüentemente usado sobre o ATM para oferecer transmissão confiável. A especificação do TCP [POS81, ALL99] também assume que o meio seja relativamente confiável, de forma que as perdas de pacotes são atribuídas a congestionamento, o que por sua vez aciona mecanismos que reduzem a vazão. Este comportamento não é o mais adequado para o meio sem fio. Assim, soluções no sentido de resolver estes problemas ao nível do ATM e produzir uma taxa de erros aceitável para as camadas superiores poderão beneficiar o uso de outras tecnologias de rede através de um canal sem fio.

Neste artigo, o desempenho da camada de enlace do ATM sem fio é estudado. Para isto, um modelo que adota ARQ e FEC para tratamento de erro em um enlace ATM sem fio é proposto. Esta é uma solução derivada de pesquisas relacionadas ao assunto [KIM98, KIM99], e seu desempenho é investigado através de simulação. Pretende-se atingir os seguintes objetivos:

- Comparar o desempenho em termos de perda de células e retardo do esquemas ARQ com retransmissão seletiva ao do ARQ e FEC juntos;
- Investigar o ganho para a taxa de perda de célula e o retardo no canal quando ARQ e FEC são usados juntos para correção de erros;
- Investigar como estas medidas de desempenho são afetadas pela presença de tráfego com dependência de longo alcance.

A Seção 2 descreve uma possível arquitetura para o sistema ATM sem fio e oferece uma visão detalhada das partes mais importantes. Na Seção 3, são apresentados os trabalhos relacionados ao uso das técnicas ARQ e FEC para melhoria da qualidade de um enlace ATM sem fio. Na Seção 4 é descrito o modelo de desempenho proposto para estudo e, por fim, na Seção 5 os resultados obtidos são analisados.

2 Arquitetura de referência para as camadas ATM sem fio

A proposta do ATM sem fio é ter uma pilha de protocolos harmonizada com a do ATM padrão, de forma que a interoperação ocorra de forma transparente. Dois subsistemas precisam ser introduzidos, um para controle do acesso via rádio e outro para gerenciamento da mobilidade [RAY96]. No primeiro caso, algumas camadas são acrescentadas à pilha: física (canal de rádio), de controle do acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control*), de controle do enlace de dados (DLC – *Data Link Control*) e de controle sem fio. Elas ficam abaixo da camada ATM do modelo de referência padrão, como mostra a Figura 1 [RAY94]. Para suporte à mobilidade, são necessárias extensões nos protocolos do plano de controle para possibilitar a migração do terminal de forma dinâmica no ATM sem fio. Principalmente para suportar as duas capacidades básicas das redes móveis: o *handoff* e o gerenciamento de localização.

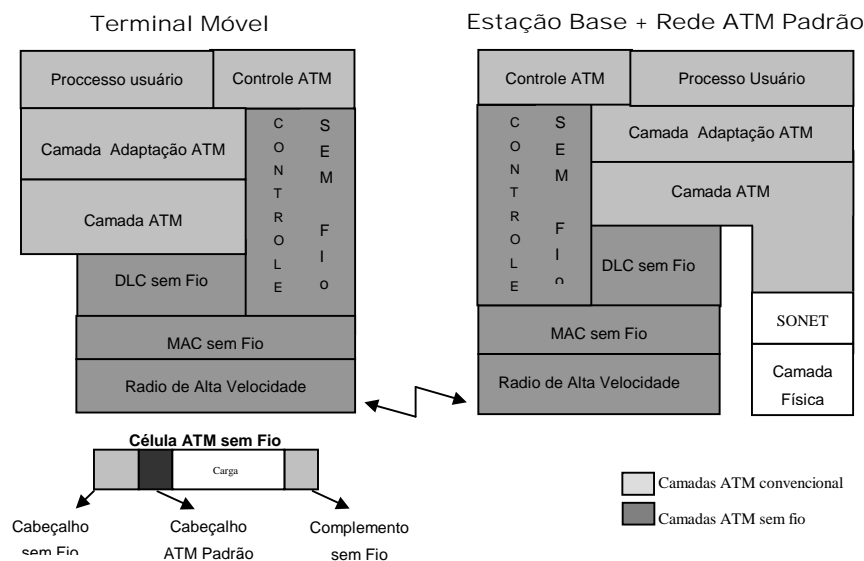


Figura 1 - Modelo de referência dos protocolos

2.1 O subsistema de acesso a rádio

O subsistema de acesso a rádio inclui as camadas que implementam o controle do acesso via rádio, ilustradas na Figura 1, são elas: camada física (rádio), camada de controle de acesso ao meio (MAC), camada de enlace de dados (DLC) e camada de controle sem fio.

Na camada física, o principal desafio é superar os efeitos da formação de multipercursos para o sinal recebido de terminais estáticos e móveis. Possíveis soluções apontam para uma arquitetura de rádio com uma estrutura micro-celular, um sistema de transmissão comutado por pacote, um modem de rádio de alta velocidade com operação na faixa de 5GHz e capacidade de transmissão em um raio na faixa de 20 até 500 m e taxas de transmissão na ordem de 25 Mbps [AYA96, POR95, JOH98].

O controle de acesso ao meio é necessário para compartilhar a largura de banda de rádio e resolver a contenção de acesso entre os usuários. Alguns protocolos para a camada

MAC do ATM sem fio baseados no TDMA (*Time Division Multiple Access*) têm sido propostos, como o MASCARA (*Mobile Access Scheme Based on Contention and Reservation for ATM*) [MIK98], o TDMA/TDD [RAY96, RAY97], o DSA++ (*Dynamic Slot Assignment*) [ANA98]. Outras soluções encontradas na literatura são o DQRUMA (*Distributed-Queuing Request Update Multiple Access*) [AYA96] e o PRMA (*Packet Reservation Multiple Access*) [NAN91].

A camada de enlace de dados em um ambiente sem fio deve assegurar um serviço de entrega de pacotes relativamente confiável. De um modo geral, é implementada usando ARQ e/ou FEC [PEN00]. Maiores detalhes sobre o controle de erro no enlace ATM sem fio serão apresentadas nas seções seguintes deste artigo.

A camada de controle sem fio deve suportar as funções do plano de controle ao nível da camada de acesso a rádio e sua integração com a rede ATM, como o controle dos recursos de rádio e funções de gerenciamento nas camadas física, de enlace e de acesso ao meio [RAY96].

2.2 Extensões para mobilidade

Duas funções imprescindíveis para o suporte à mobilidade dentro de uma rede ATM são gerenciamento de localização para mapear o nome dos usuários à atual posição deles e controle de *handoff* para roteamento dinâmico dos canais virtuais (VCs – *Virtual Channels*) durante a migração do terminal.

Para o estabelecimento de conexões entre o terminal móvel e a estação base, o primeiro deve ser localizado. Algumas possibilidades são a busca do móvel na rede por meio de difusão ou o registro pelo próprio dispositivo móvel de sua localização junto à rede, viabilizando um mecanismo de roteamento estático até o ponto de registro. A primeira só é viável em sistemas de pequeno porte. Para sistemas maiores, a segunda técnica se mostra mais adequada pela sua escalabilidade. Em [POR95], é proposto um esquema de registro hierárquico. Métodos baseados nos conceitos usados no IS-41 e no GSM, com bases de dados para registro da localização de residência (*home location register*) e registro da localização como visitante (*visitor location register*), também são citados na literatura [AYA96, RAY96].

No controle de *handoff*, a renegociação dos parâmetros de QoS da conexão fim-a-fim faz-se necessário quando o terminal move-se para a área de cobertura de uma estação base que não está apta a oferecer a mesma QoS da anterior. Além disso, considerando que existirá um período de tempo em que o caminho dos dados na conexão fim-a-fim estará incompleto, uma preocupação do ATM sem fio é também minimizar os efeitos da interrupção da QoS durante o *handoff*.

2.3 Projetos ATM sem fio

Algumas propostas para ATM sem fio são listadas a seguir. Embora cubra alguns dos mais importantes projetos, não é uma lista exaustiva, compreendendo principalmente LANs sem fio. São elas: WATMnet, desenvolvido pelo NEC C&C Research Laboratories [RAY97, JOH98]; Magic WAND (*Wireless ATM Network Demonstrator*), pela ACTS (*Advanced Communications Technologies and Services*) da União Européia [MIK98]; ORL Rádio ATM,

pelo Laboratório de Pesquisa Cambridge-Olivetti [POR95] e o projeto BAHAMA (*Broadband Ad Hoc ATM Anywhere*), pelo Bell Laboratories [ENG95].

3 Trabalhos relacionados

O desempenho na transmissão em um enlace sem fio ATM pode ser melhorado pelo uso de esquemas de controle de erro. Duas classes de controle de erro são mais comuns: FEC e ARQ. As técnicas que vêm sendo propostas em pesquisas na área são apresentadas nas subseções seguintes.

3.1 FEC para ATM sem fio

Uma forma de melhorar a qualidade do canal é alocando bits excedentes para corrigir ou detectar o máximo de erros no receptor, técnica comumente referenciada como FEC (*Forward Error Correction*), mantendo um compromisso com a eficiência da comunicação.

Uma codificação de bloco atribui a cada bloco de k bits de informação uma palavra de código com n bits, $n > k$. Um código assim formado é descrito na literatura como código de bloco (n,k) . A relação entre o número de bits de informação e o número de bits da palavra código correspondente, k/n , é denominada taxa do código. De maneira geral, quanto menor for a taxa de um código, maior será a sua capacidade de detecção e correção de erros, devendo neste último caso, ser considerada a introdução de um *overhead* devido aos bits extras alocados.

Nos códigos convolucionais, uma seqüência contínua de bits de informação com tamanho variável é mapeada em uma outra seqüência contínua de bits codificados. Um codificador convolucional é dito com memória, pois um determinado bit codificado depende de um ou mais bits de informação anteriores combinados linearmente.

Códigos mais eficientes são necessários para lidar com os erros em rajadas, comuns na comunicação sem fio. Hoje, em vários destes sistemas são utilizados, por exemplo, codificações em cascata que podem conter somente codificadores de bloco, de bloco e convolucionais ou somente convolucionais – são os códigos concatenados.

Neste trabalho, destaque é dado aos códigos de bloco lineares BCH (n,k) [PRE92], pois é este o código FEC usado no modelo de ATM sem fio que serviu de base para o estudo realizado. Essa classe de código é proposta para correção de erros em comunicação sem fio de um modo geral e mais especificamente para ATM sem fio, como será mostrado a seguir.

Em Aikawa et al. [AIK97], é proposto um esquema de controle de erro onde dois códigos FEC são adicionados à célula ATM (excluindo o HEC). O HEC é removido antes da transmissão pelo canal de rádio para tornar mais eficiente a transmissão. São adicionados então dois códigos FEC à célula ATM, um no cabeçalho com uma codificação que represente maior capacidade de correção e detecção e outra para carga com taxa do código mais alta. Depois da transmissão sem fio, um novo HEC é gerado para a parte fixa.

Técnicas de codificação fixa no pacote não levam em conta que as estatísticas de erro em um canal sem fio de uma maneira geral variam muito com o tempo. Por esta razão, Chen et al. [CHE99] indicam o uso de uma cadeia de Markov para obter uma previsão do comportamento futuro do canal. Caso ocorram altas incidências de erro, um código BCH (n, k) de tamanho maior (capaz de corrigir mais erros) pode ser usado.

Uma adequação entre a taxa de codificação e a alocação eficiente de largura de banda para a transmissão sem fio é o que se vem tentando obter na maioria dos trabalhos que apontam FEC como solução. Entretanto, para o caso de canais que não possuem grande largura de banda, como é o caso de determinados enlaces sem fio, FEC não é o mais indicado. Seu uso pode trazer o benefício de detectar e corrigir um número limitado de bits, mas o prejuízo em termos de banda pode ser considerável.

3.2 ARQ para ATM sem fio

Protocolos ARQ (*Automatic Repeat Request*) também são usados para transferência de dados de forma confiável em comunicações sem fio. O transmissor envia um pacote que consiste em bits de carga e um código para detecção de erro. O receptor verifica a integridade dos dados e uma notificação (ACK) deve ser devolvida ao transmissor. Três esquemas básicos de protocolos ARQ podem ser utilizados: pare e espere, volte a N e retransmissão seletiva.

O esquema ARQ pare e espere tem a vantagem de relativa simplicidade para o tratamento analítico, e foi proposto como solução para controle de erro ATM sem fio junto com código FEC no modelo proposto em Kim e Krunz [KIM98], que será mais bem detalhado a seguir.

O ARQ volte a N é apontado como um protocolo mais simples, pois o receptor não interfere nas células transmitidas, enquanto no de retransmissão seletiva a possibilidade de recebimento fora da ordem obriga o receptor a manter um *buffer* para garantir o seqüenciamento correto das células. Por outro lado, o volte a N é mais sensível em relação à taxa de erros (BER - *Bit Error Rate*) que a retransmissão seletiva, porque a retransmissão da janela inteira é causada por um único pacote com erro.

Alguns estudos foram realizados tratando o retardo como medida de desempenho do ARQ com retransmissão seletiva sobre um enlace sem fio. Uma alternativa de análise exata para o retardo foi proposta em Anagnostou e Protonotarios [ANA86], baseada em uma aproximação chamada ARQ com retransmissão seletiva ideal, onde a dependência entre o processo de enfileiramento e a história de transmissão é ignorada. Neste caso, se o RTT (*round-trip time*) tende a zero, o comportamento do esquema de retransmissão seletiva é semelhante ao do pare e espere. Esta aproximação foi também usada na análise do retardo em Fantacci [FAN96] e em Kim e Krunz [KIM99].

Muito comum tem sido a combinação do ARQ com outros esquemas para controle de erro em canais sem fio, como será visto na próxima seção. De uma maneira geral, o ARQ trabalha bem quando a taxa de erro é baixa, caso contrário o desempenho do ARQ sozinho como solução para enlace sem fio deixa a desejar, pois requer uma grande quantidade de largura de banda por causa das retransmissões.

3.3 Esquemas híbridos para ATM sem fio

Os esquemas híbridos são classificados por Joe [JOE00] em tipos I e II. Em esquemas do tipo I, cada pacote inclui códigos fixos para correção e detecção de erros. No receptor, o FEC tenta primeiro corrigir os erros. Se um padrão impossível de corrigir é detectado, o receptor então solicita uma retransmissão usando ARQ. O esquema híbrido tipo II é baseado na idéia de codificação adaptativa. Uma taxa de codificação alta é usada (somente para detecção de erro, por exemplo) quando as condições são boas. Após um determinado número de retransmissões do pacote, bits extras são enviados junto ao pacote (com capacidade de correção) para produzir uma taxa de codificação baixa. Esquemas híbridos têm sido indicados como solução mais viável para ATM sem fio.

No esquema híbrido proposto em Joe [JOE00], é adotada, além de um novo protocolo ARQ, uma taxa de codificação adaptativa, que adiciona redundância incremental através de um código FEC concatenado. O objetivo dele foi avaliar o desempenho deste esquema adaptativo híbrido em redes ATM sem fio.

Cain e McGregor [CAI97] propõem uma arquitetura para controle de erro com códigos FEC concatenados, *interleaving* (para canal com erros em rajadas) e um protocolo ARQ para resolver problemas com a qualidade do canal quando redes ATM são adotadas em enlaces sem fio.

No estudo do retardo fim-a-fim para transmissão usando sistemas ARQ e FEC realizado por Bonatti e Brito [BON01] foi considerado um esquema híbrido simples onde usa-se ARQ a maior parte do tempo e FEC somente quando a qualidade do canal é muito ruim. Dada uma comparação no desempenho entre ARQ e FEC mostrando que em ambientes não adaptativos, o FEC somente tem melhor desempenho que o ARQ quando a qualidade do canal é muito pobre ($=10^{-2}$). Mas quando se trata de um sistema com capacidade adaptativa, o FEC mostrou-se tão bom quanto ou melhor que ARQ para praticamente toda a faixa de BER avaliada ($10^{-5} - 10^{-2}$).

Uma combinação de ARQ e FEC foi usada ainda em Kim e Krunz [KIM98], que investigam o comportamento da perda de células de um enlace ATM sem fio como uma função da largura de banda atribuída e dos esquemas de controle de erro. Foi apresentada uma expressão aproximada para a taxa de perda de células (CLR – *Cell Loss Rate*) da qual foi derivada uma outra expressão para a largura de banda efetiva num ambiente sem fio. O instrumental matemático obtido pode também ser usado para investigar o código FEC ótimo que garanta uma determinada CLR maximizando a utilização da largura de banda sem fio.

4 O estudo realizado

Foi avaliado o desempenho do ATM sem fio em um cenário onde rádio terrestre transporta os dados entre o ponto de acesso (estação base) e o terminal móvel. Trata-se de uma conexão já estabelecida, mas que sofre interferências do meio sem fio e necessita de mecanismos para controle de erro. Mais especificamente, simula-se o funcionamento da camada de enlace no ATM sem fio.

Supõe-se que o múltiplo acesso seja suportado através de TDMA, o que justifica o uso de um código de bloco [CAI97]. Entretanto, na simulação do modelo representativo da camada de enlace é ignorado o *overhead* introduzido pela camada de acesso ao meio.

O modelo utiliza o esquema híbrido (tipo I) como mecanismo de controle de erro. O código de bloco BCH (n,k) como solução FEC, devido à sua relativa simplicidade de codificação e decodificação, bem como a geração de códigos menores. E um esquema ARQ com retransmissão seletiva.

A análise do modelo foi feita para tráfegos com dependência de curto e de longo alcance. A intenção aqui é avaliar também como as medidas de desempenho são afetadas pelas correlações nas redes sem fio. Para isso, as fontes de tráfego são caracterizadas pelos modelos *On-Off* exponencial e *On-Off* Pareto [WIL97].

Para capturar a natureza do canal sem fio, cuja qualidade varia com o tempo, o canal foi modelado usando uma versão fluida do modelo de Gilbert-Elliott, onde o comportamento do canal varia entre dois estados: *Good* e *Bad*. E as durações deles são exponencialmente distribuídas. Este modelo é altamente usado para descrever a ocorrência de desvanecimentos no canal [GUO94, FAN96, KIM98].

4.1 O modelo

A Figura 3 ilustra um modelo do sistema em estudo, um enlace sem fio que recebe fluxos de tráfego.

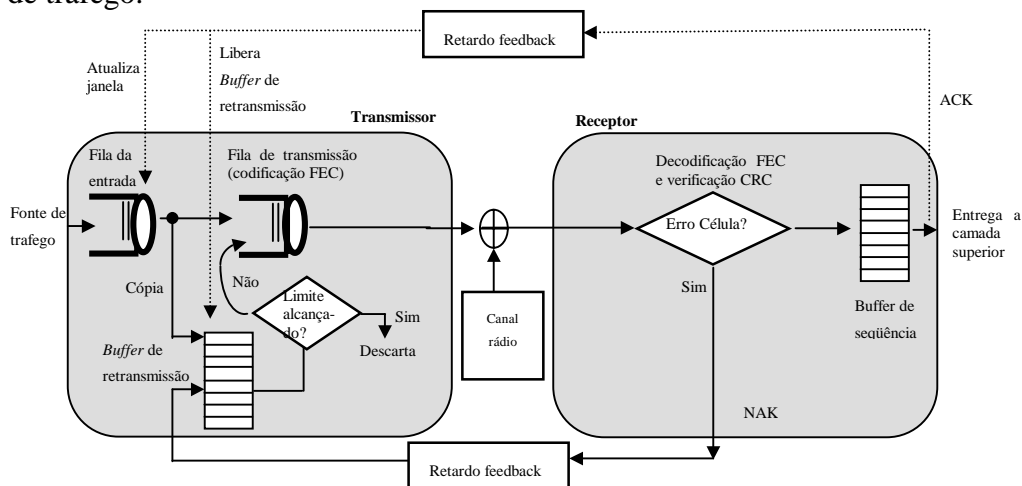


Figura 3 – Modelo para simulação do sistema proposto

No lado do transmissor o *buffer* FIFO de capacidade finita (o qual pode ocasionalmente receber células além da sua capacidade, caso em que acontece descarte) tem associado um mecanismo de janela deslizante para controlar o número de células que podem ser enviadas ao receptor sem esperar por um reconhecimento (ACK) de retorno. Na figura 3 é possível identificar o controle da janela na fila de entrada, uma célula só será encaminhada para a fila de transmissão se houver crédito, ou seja, se a janela não estiver completamente preenchida, caso contrário o transmissor ficará ocioso, o que possivelmente agrava as perdas. Todavia, sempre que o receptor envia uma notificação de recebimento da célula (ou células)

que ocupa a posição à direita na janela, um (ou alguns) deslizamento da janela acontece, possibilitando a transmissão de uma (ou mais de uma) nova célula. A cada célula é atribuído um número de seqüência. Uma codificação FEC é adicionada à célula ATM sem fio, o que viabiliza a correção de um número limitado de bits no lado do receptor. Em seguida o CRC (parte integrante da célula ATM sem fio) é verificado. Se pelo menos um erro for detectado, um NAK é enviado de volta ao transmissor, ocorrendo uma retransmissão da célula com erro, cuja cópia é mantida no *buffer* de retransmissão até sua chegada com sucesso. Caso a célula já tenha sido retransmitida um certo número máximo de vezes, ela será descartada.

A fila de transmissão possui uma taxa de serviço constante c , que corresponde a taxa de transmissão do canal. Embora o transmissor envie as células em ordem, no receptor elas podem estar fora da seqüência se ocorrerem erros na transmissão. Assim, células recebidas cujo identificador de seqüência seja maior que o esperado devem esperar em um buffer (chamado *buffer* de seqüência) até que a célula de menor identificador seja recebida.

4.2 Simulação

A intenção do estudo de simulação foi obter a taxa de perda de células e o retardo para o enlace sem fio. Os fatores que provocam as perdas são o estouro da capacidade do *buffer* de entrada e um limite máximo para retransmissões. Os componentes do retardo são o retardo de transmissão (enfileiramento e transporte) e o retardo de seqüência (espera no *buffer* de seqüência). Além disso, foi investigado o impacto das correlações do tráfego no meio sem fio.

Nos experimentos, variou-se somente a BER do canal no estado *Bad* (tabela 2), enquanto que no estado *Good* ela é mantida em $P_{eg} = 10^{-6}$. Os parâmetros relacionados ao canal sem fio foram obtidos em Kim e Krunz [KIM98]. Para o ARQ com retransmissão seletiva, está sendo assumida uma janela de tamanho 2. O tamanho da célula ATM sem fio e da mensagem ACK utilizada na simulação, foram respectivamente 440 e 74 bits, baseado em [RAY96, JOH98]. A Tabela 2 reúne os valores dos parâmetros usados na simulação, sendo (a) aqueles relacionados à fonte de tráfego e (b) os relacionados ao enlace sem fio:

Tabela 2 - Valores dos parâmetros usados na simulação: a) das fontes de tráfego e b) do enlace sem fio.

Parâmetros Fontes	Valor
Taxa pico	1 Mbps
Período médio ON	0,02304 seg
Período médio OFF	0,2304 seg
α_{on} (dist. Pareto)	1,6
α_{off} (dist. Pareto)	1,4

(a)

Parâmetros Enlace	Valor
Buffer de entrada (em células)	100-1000/ 1000-10000
Janela ARQ	2 células
BER no estado Bad	10^{-2} e 10^{-5}
BER no estado Good	10^{-6}
Período médio Good	0,1 seg
Período médio Bad	0,0333 seg
Retardo de Prop.	$33,3e^{-7}$ seg

(b)

Assumindo que o FEC pode corrigir t bits e que os erros de bits que ocorrem durante um determinado estado são independentes, a probabilidade que a célula contenha um erro que não será corrigido é:

$$P_{ec}(p_b, t) = \sum_{i=t+1}^n \binom{n}{i} p_b^i (1 - p_b)^{n-i}, \quad (1)$$

onde p_b é a probabilidade de erro de bit e $p_b \in \{P_{eg}, P_{eb}\}$, com P_{eg} indicando a BER no estado *Good* e P_{eb} a BER no estado *Bad*. Na simulação, a probabilidade de erro na célula é calculada a partir de (1), para ambos os estados. O código FEC é aplicado à célula sem fio considerando um tamanho k de 441 bits. A Tabela 1 mostra algumas combinações para o tamanho, a taxa de código e o número de bits que podem ser corrigidos pelo código BCH usado.

Tabela 1 - Taxa de código FEC e número de bits corrigidos usando BCH.

(n, k)	t	k/n
(476, 440)	4	0,92
(503, 440)	7	0,87

Os resultados para as probabilidades de perda de célula e retardos foram obtidos com intervalos de confiança sempre a 95% de nível de confiança.

4.3 Resultados

Inicialmente, foram feitas simulações com fontes *On-Off* exponenciais. Procurou-se comparar os esquemas ARQ com retransmissão seletiva e o híbrido (ARQ+FEC). No primeiro estudo, a CLR (figura 5) e o retardo total (figura 6) foram obtidos em função do tamanho do *buffer* para: taxa de transmissão $c = 0,3$ Mbps, $P_{eb} = \{10^{-2}, 10^{-5}\}$, as retransmissões infinitas e o número de bits corrigíveis pelo FEC $t = 4$. Observou-se uma melhora significativa para uma qualidade ruim do canal sem fio ($P_{eb} = 10^{-2}$), quando adotando o esquema híbrido, tanto em termos da probabilidade de perda de células quanto do retardo. Entretanto, quando a qualidade do canal é boa ($P_{eb} = 10^{-5}$) o ARQ sozinho chega a representar melhor performance, isto se deve ao fato de que os erros são mais raros. Neste caso, um número menor de retransmissões pode ser necessário e/ou os bits extras alocados para o FEC não representam ganho algum e acabam aumentando a demanda por largura de banda.

Nos experimentos seguintes, o objetivo é obter um valor “ótimo” (no contexto do sistema em estudo) para o número de bits corrigíveis pelo FEC (t). Nas figuras 7 e 8 investigou-se o comportamento da CLR e o do retardo como função do número de bits corrigíveis pelo FEC, variando o limite do número de retransmissões (0, 5, 10 e infinito), onde a taxa de transmissão $c = 0,3$ Mbps e a $P_{eb} = 10^{-2}$. O valor ótimo encontrado em termos de CLR para o número de bits corrigíveis pelo FEC foi $t = 7$. Observou-se que para $t > 7$ as probabilidades de perda e o retardo chegam a aumentar quando o tamanho do *buffer* cresce, possivelmente porque os bits excedentes passam a comprometer a banda disponível. A partir deste valor (7), quando variando o limite máximo de retransmissões (para valores > 0), nem a CLR nem o retardo são influenciados, indicando realmente que o desempenho diminui nos dois casos devido à maior alocação de banda. Pode-se deduzir também que com a adoção do

esquema híbrido é possível encontrar um ponto de equilíbrio, ou seja, configurações para as quais não haverá grandes variações das medidas de performance e onde um número relativamente baixo de retransmissões é necessário, o que em termos de retardo é uma vantagem.

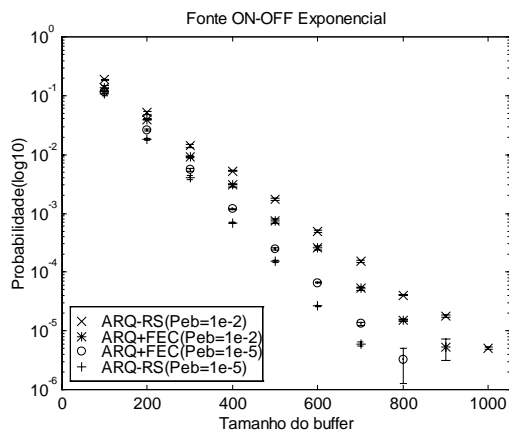


Figura 5 – CLR vs *buffer* ($c = 0,3$ Mbps, ARQ com $\text{Ret} = \text{inf}$ e FEC com $t = 4$).

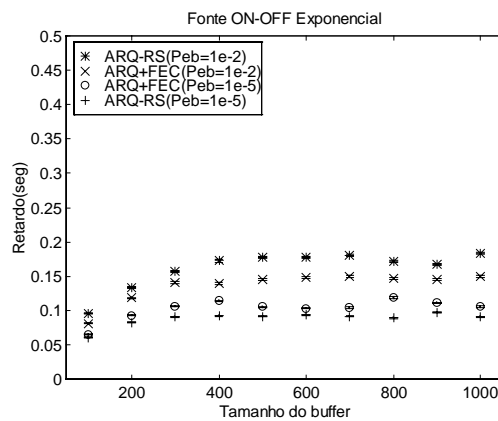


Figura 6 – CLR vs *buffer* ($c = 0,3$ Mbps, ARQ com $\text{Ret} = \text{inf}$ e FEC com $t = 4$).

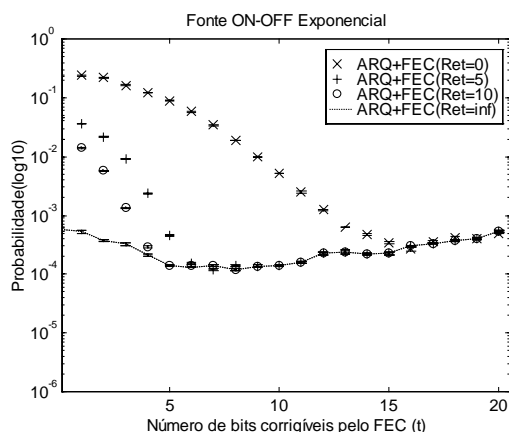


Figura 7 – CLR vs. t ($P_{eb} = 1e-2$, $c = 0,3$ Mbps e *buffer* = 600 células).

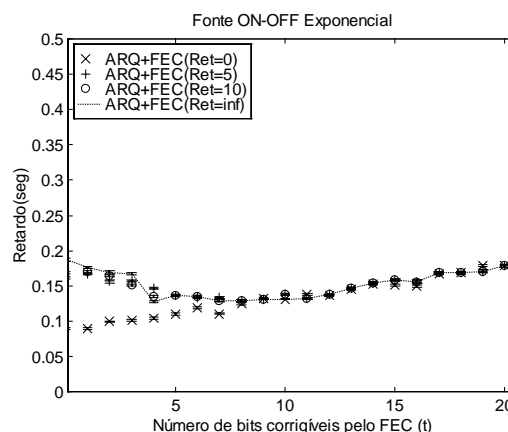


Figura 8 – Retardo total vs. t ($P_{eb} = 1e-2$, $c = 0,3$ Mbps e *buffer* = 600 células).

As figuras 9 e 10 apresentam as curvas da CLR e do retardo pelo tamanho do *buffer* variando a $P_{eb} = \{10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-5}\}$, com $c = 0,3$ Mbps, $t = 7$ e número de retransmissões infinito. Com o t otimizado, os valores da CLR (e retardo também) para diferentes taxas de erro de bits (mesmo tamanho de *buffer*) são bem próximos, constatando uma melhora na performance para uma pior qualidade do canal sem fio ($P_{eb} = 10^{-2}$). Além disso, comparando as curvas ARQ+FEC para $t = 4$ (figuras 5 e 6) e para $t = 7$ (figuras 9 e 10) para os tamanhos de *buffer*s de 600 e 700 células, o ganho da CLR foi cerca de 50% e 39% e do retardo em 11% e 14%, respectivamente.

A figura 11, cujo gráfico foi obtido variando o número de retransmissões (0, 2, 5, infinito), com $P_{eb} = 10^{-2}$, $c = 0,3$ Mbps e $t = 7$, mostra a CLR como função do tamanho do *buffer*. Neste gráfico, a partir de um determinado tamanho de *buffer* (que depende do limite máximo de retransmissões) a probabilidade de perda estaciona, possivelmente determinando o ponto de equilíbrio. Isto acontece porque à medida que o tamanho do *buffer* aumenta, as

perdas pelo estouro da capacidade do *buffer* diminuem e chega-se a um ponto em que as perdas são provocadas exclusivamente pelo limite no número de retransmissões e como o esquema híbrido atenua as perdas provocadas pelas retransmissões, o desempenho acaba chegando a um ponto máximo de otimização.

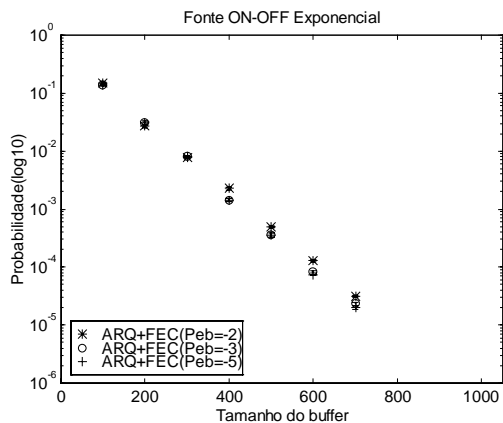


Figura 9 – CLR vs. *buffer* ($c = 0,3$ Mbps, $t = 7$ e $Ret = \text{inf}$).

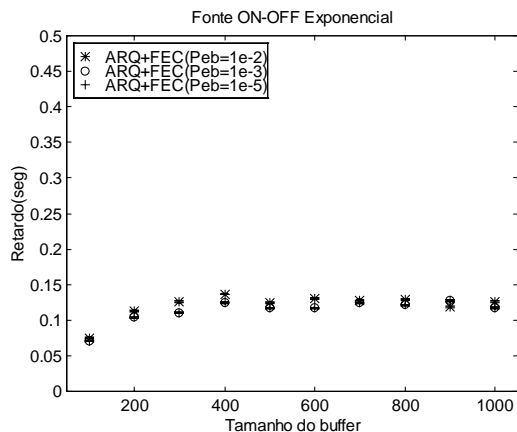


Figura 10 – Retardo total vs. *buffer* ($c = 0,3$ Mbps, $t = 7$ e $Ret = \text{inf}$).

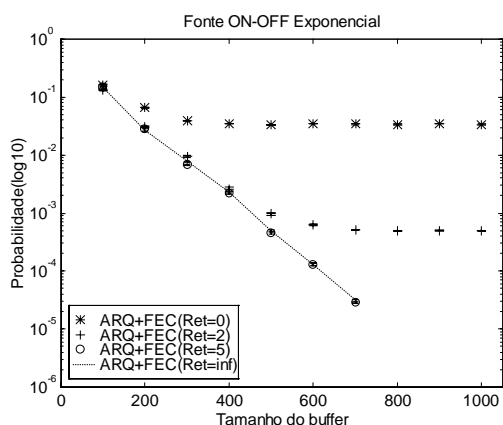


Figura 11 – CLR vs. *buffer* ($P_{eb} = 1e-2$, $t = 7$ e $c = 0,3$ Mbps).

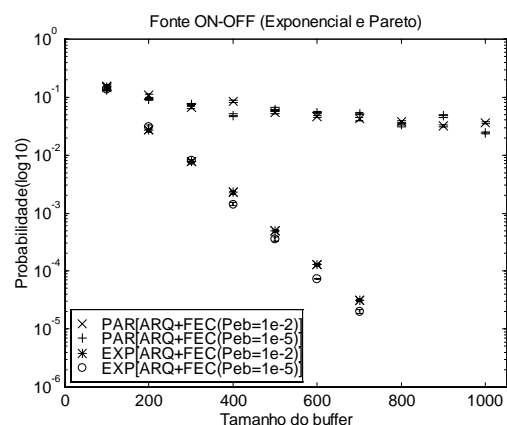


Figura 12 – CLR vs. *buffer* ($c = 0,3$ Mbps, $t = 7$ e $Ret = \text{inf}$).

Considera-se agora o objetivo proposto anteriormente de investigar o tráfego modelado com dependência de longo alcance. O próximo estudo (figura 12) compara a CLR em função do *buffer* para tráfego gerado com *On-Off* exponencial e *On-Off* Pareto, variando para cada caso a $P_{eb} = \{10^{-2}, 10^{-5}\}$. Como esperado, em ambos os casos, as perdas com Pareto são maiores, dada a alta variabilidade do tráfego gerado através desta distribuição. Os parâmetros utilizados neste estudo foram $c = 0,3$ Mbps, infinitas retransmissões, $P_{eb} = 10^{-2}$ e $t = 7$.

A figura 13, por sua vez, mostra a influência importante que a taxa de transmissão exerce na CLR na presença de tráfego com dependência de longo alcance. Ela descreve a CLR versus o tamanho do *buffer* (1000-10000) variando $c = \{0,2; 0,4; 0,6; 0,8\}$ Mbps. Considera-se ainda o número de retransmissões infinito, $P_{eb} = 10^{-2}$ e $t = 7$. Observa-se que para as simulações usando o modelo *On-Off* Pareto, só são conseguidos valores aceitáveis para a CLR com um aumento substancial no tamanho dos *buffers* (uma ordem de grandeza) e na taxa de transmissão (diminuindo o fator de multiplexação estatística).

Na figura 14 é apresentada a CLR pelo *buffer* para números máximos de retransmissões = {0, 2, 5, infinito}, adotou-se também $P_{eb} = 10^{-2}$, $t = 7$ e $c = 0,6$ Mbps, já que esta configuração demonstrou nos resultados anteriores (figura 13) um desempenho razoável em termos da CLR. Observa-se que o comportamento da CLR de não variar com o aumento do tamanho do *buffer* neste caso, não ficou evidenciado como para o tráfego gerado através de *On-Off* exponencial (figura 11), dois motivos são prováveis, ou a alta variabilidade do tráfego gerado atenua a diminuição da probabilidade de perda ou, devido à configuração de alguns parâmetros adotados, que podem ainda ser otimizados, como taxa de transmissão e número de bits corrigíveis pelo FEC.

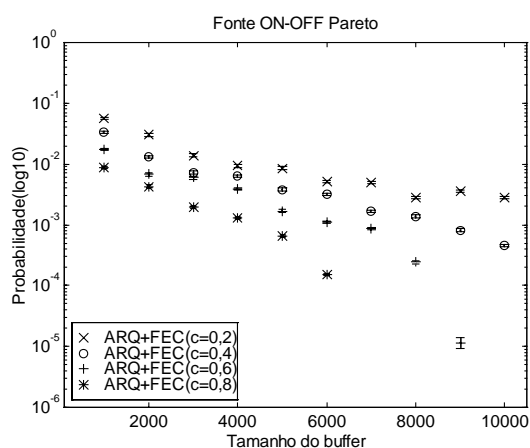


Figura 13 – CLR vs. *buffer* ($P_{eb} = 10^{-2}$, $t=7$ e Ret=inf.).

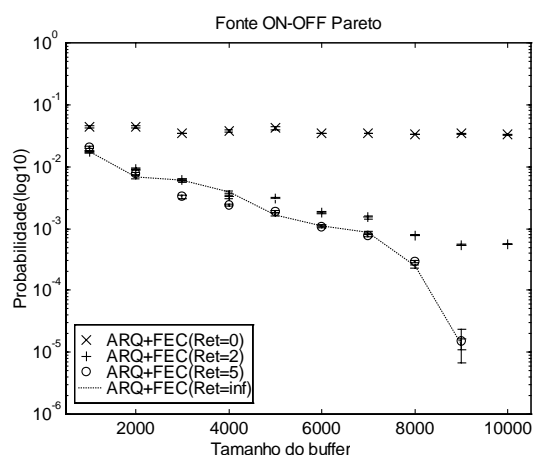


Figura 14 – CLR vs. *buffer* ($c = 0,6$ Mbps, $P_{eb} = 10^{-2}$, $t = 7$).

5 Conclusões

Neste artigo, foi investigado o desempenho da CLR e do retardo através de simulação para um enlace ATM sem fio. O canal sem fio está mais suscetível a erros, por isso um esquema híbrido usando ARQ com retransmissão seletiva e FEC é proposto para controle de erro no enlace sem fio. Foram gerados tráfegos com dependência de longo e curto alcance. Os principais resultados indicam que:

- Quanto a CLR e o retardo, o esquema ARQ+FEC apresentou desempenho melhor que o ARQ sozinho para altas probabilidades de erro no canal, isto analisando tráfego com dependência de curto alcance;
- A partir de experimentos variando os valores para o número de bits corrigíveis pelo FEC foi possível observar que aplicando o t “ótimo”, a melhoria da CLR e do retardo (principalmente quando a qualidade do canal sem fio está ruim) compensam o custo da alocação de banda extra;
- Assumindo que o esquema ARQ+FEC representa o melhor resultado também para tráfego com dependência de longo alcance, o desempenho da CLR foi investigado e constatou-se que também no caso de um canal sem fio, recursos diferenciados devem ser alocados quando este tipo de tráfego estiver sendo considerado.

Referências

- [AIK97] AIKAWA, Satoru, MOTOYAMA, Y. and UMEHIRA, M. *Error correction and error detection techniques for wireless ATM*. *Wireless Networks*, 3, p. 285-290, 1997.
- [AKY97] AKYILDIZ, I.F. and BERHARDT. *ATM Local Area Networks: A Survey of Requirements, Architectures, and Standards*. *IEEE Communications Magazine*, v. 35, n. 7, p. 72-80, July 1997.
- [ALL99] ALLMAN, M., PAXSON, V. and STEVENS, W.R. *TCP Congestion Control*. RFC-2581, April 1999.
- [ANA86] ANAGNOSTOU, M. E. and PROTONOTARIOS, E. N. *Performance Analysis of the selective repeat ARQ protocol*. *IEEE Trans. Commun.*, v. 34, n. 2, p. 127-135, February 1986.
- [ANA98] ANASTASI, Giuseppe, LENZINI, Luciano and MINGOZZI, Enzo et al. *MAC Protocols for Wideband Wireless Local Access: Evolution Toward Wireless ATM*. *IEEE Personal Communications*, October 1998.
- [ATK94] ATKINSON, R. *Default IP MTU for Use over ATM AAL5*. RFC-1626, May 1994.
- [AYA96] AYANOGLU, E., ENG, K. Y. and KAROL, M. J. *Wireless ATM: Limits, Challenges, and Proposals*. *IEEE Personal Communications*, n. 8, p.18-33, August 1996.
- [BON01] BONATTI, Ivanil S. and BRITO, José M. C. *A Simple Hybrid ARQ-FEC Scheme to Control Errors in the Wireless Link in Wireless ATM Networks*. III Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel. Recife, agosto de 2001.
- [CAI97] CAIN, J. B. and MCGREGOR, D. N. *A Recommended Error Control Architecture for ATM Networks with Wireless Links*. *IEEE JSAC*, v. 15, n. 1, p. 16-28, Jan. 1997.
- [CHE99] CHEN, R, CHUA, K.C et al. *Adaptive error coding using channel prediction*. *Wireless Networks*, 5, p. 23-32, 1999.
- [ENG95] ENG, K.Y. et. al. *BAHAMA: A Broadband Ad-Hoc Wireless ATM Local Area Network*. *Proc. ICC'95*, p. 1216-23.
- [ETS97] ETSI, BRAN (Broadband Radio Access Networks). Disponível em <http://www.etsi.fr/bran/>
- [ETS98] ETSI, *The ETSI UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA) ITU-R RTT Candidate Submission*, June 1998. Disponível em <http://www.itu.int/imt/2-radio-dev/proposals/>
- [FAN96] FANTACCI, R. *Queueing analysis of the selective repeat automatic repeat request protocol wireless packet networks*. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, v. 45, n. 2, p. 258-264, May 1996.
- [GUO94] GUO, N. e MORGERA, S.D. *Frequency-hopped ARQ for Wireless Networks Data Services*. *IEEE J Select. Areas Commun*, v. 12, n. 8, p. 1324-1336, September 1994.
- [JOE00] JOE, Inwheel. *A novel adaptive hybrid ARQ scheme for wireless ATM networks*. *Wireless Networks*, 6, p. 211-219, 2000.
- [JOH98] JOHNSTON, C. A., NARASIMHAN, P. e KOKUDO, J. et al. *Architecture and Implementation of Radio Access Protocols in Wireless ATM Networks*. NEC USA – C&C Research Laboratories, Princeton, NJ. Capturado em dezembro 1998. On-

line. Disponível na Internet: <http://camars.kaist.ac.kr/~skjean/Life/index.html>

- [KIM98] KIM, J. G. and KRUNZ, M. *Effective Bandwidth in Wireless ATM Networks*. Proceedings of the IEEE/ACM MobiCom'98 Conference, pp. 233-241, Oct. 1998. Disponível em <http://www.ece.arizona.edu/~krunz/papers.html>
- [KIM99] KIM, J. G. and KRUNZ, M. *Delay Analysis of Selective Repeat ARQ for a Markovian Source Over a Wireless Channel*. Technical Reports, Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Arizona, September 1999. Disponível em <http://www.ece.arizona.edu/~krunz/papers.html>
- [LAU94] LAUBACH, M. *Classical IP and ARP over ATM*. RFC-1577, January 1994.
- [MAR97] MARCO, M. De, PATTAVINA, A. and RODA, D. *Resource Management Mechanisms in Wireless ATM Networks*. CEFRIEL/Politec. di Milano, Milan, Italy 1997.
- [MIK98] MIKKONEN, Jouni, ALDIS, James, AWATER, Geert et al. *The Magic WAND – Functional Overview*. IEEE JSAC, n. 6, p. 953-972, August 1998.
- [NAN91] NANDA, S., GOODMAN, D.J. and TIMOR, U. *Performance of PRMA: A Packet Voice Protocol for Cellular Systems*. IEEE Trans. Veh. Tech., vol VT-40, p. 584-598, 1991.
- [PEN00] PENTIKOUSIS, K. *TCP in Wired-Cum-Wireless Environments*. IEEE Comm. Sur. & Tutorials. Capturado em dezembro 2001. On-line. Disponível na Internet: <http://www.comsoc.org/livepubs/surveys/public/2000/dec/pentikousis.html>
- [POR95] PORTER, J. and HOPPER, A. *An Overview of the ORL Wireless ATM System*. Proc. IEEE ATM Workshop, Washington, DC, Oct 1995.
- [POS81] POSTEL, J.B. *Transmission Control Protocol*. RFC-793, September 1981
- [PRE92] PRETZEL, Oliver. *Error-Correcting Codes and Finite Fields*. Oxford Applied Math. and Computing Science Series. Oxford University Press Inc. New York, 1992.
- [RAU97] RAUHALA, K. Living List Document of Wireless ATM Working Group. ATM Forum/ltd-watm-01.01, Februaty 1997.
- [RAY92] RAYCHAUDHURI, Dipankar, WILSON N. *Multimedia Personal Communications Networks: System Design Issues*. Proc. 3rd WINLAB Workshop on 3rd Generation Wireless Information Networks, April 1992.
- [RAY94] RAYCHAUDHURI, Dipankar, WILSON N. *ATM Based Transport Architecture for Multiservices Wireless Personal Communications Networks*. IEEE JSAC, n. 8, p. 1401-14, October 1994.
- [RAY96] RAYCHAUDHURI, Dipankar. *Wireless ATM Networks: Architecture, System Design and Prototyping*. IEEE Personal Communications, n. 8, p. 42-49, august 1996.
- [RAY97] RAYCHAUDHURI, Dipankar et al. *WATMnet: A Prototype Wireless ATM System for Multimedia Personal Communication: Architecture, System Design and Prototyping*. IEEE JSAC, n. 1, p. 83-95, January 1997.
- [WIL97] WILLINGER, Walter, TAQQU, M. S., e SHERMAN, R. et al. *Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level*. IEEE/ACM Transactions on Networking, v. 5, n. 1, pp. 71-86. February 1997