

UMA COMPARAÇÃO ENTRE FEC E ARQ PARA TRÁFEGO EM TEMPO REAL EM REDES ATM SEM FIO

José Marcos C. Brito

Inatel - Instituto Nacional de Telecomunicações
Santa Rita do Sapucaí, Brasil

Ivanil S. Bonatti

Unicamp - Universidade Estadual de Campinas
Departamento de Telemática - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Campinas, Brasil

RESUMO

As redes ATM foram concebidas considerando um enlace óptico na camada física. O principal problema de se implementar uma rede ATM sem fio é a taxa de erro elevada e variável do rádio-enlace, obrigando à utilização de mecanismos de controle adicionais no enlace sem fio. Neste artigo, o desempenho dos sistemas FEC e ARQ, considerando a transmissão de tráfego em tempo real, é analisado, com base em expressões analíticas de vazão e atraso destes sistemas. Uma metodologia para definição do código a ser utilizado no sistema ARQ, de modo a maximizar a vazão e minimizar o atraso, é apresentada.

ABSTRACT

The ATM networks were primarily conceived having an optical link in the physical layer. The major problem to implement a wireless ATM system is the high and variable bit error rate in the radio link. To overcome this problem an additional error control scheme in the wireless link can be used. In this paper, the performance of the FEC and ARQ schemes, considering a real time application, is analysed based on throughput and delay analytical expressions. An approach to define the code in ARQ system, searching for the maximum throughput and minimum delay, is proposed. The FEC system performs better than the ARQ system in most of bit error rate range.

1. INTRODUÇÃO

Comunicações em faixa larga e comunicações sem fio são os dois principais impulsionadores da indústria de telecomunicações no momento. O ATM (Asynchronous Transfer Mode) é o padrão do ITU-T para a RDSI-FL (Rede Digital de Serviços Integrados – Faixa Larga) e vem sendo adotado pelas operadoras de telecomunicações como solução para implementação de seus *backbones*. Uma das principais vantagens do ATM é a possibilidade de se transportar tráfegos de diferentes perfis com qualidade de serviço (QoS) garantida. A unidade básica de multiplexagem e comutação no ATM é denominada de célula, e é composta de um campo de carga útil com 48 octetos e um cabeçalho de 5 octetos, totalizando 53 octetos.

As redes ATM sem fio combinam as seguintes vantagens: liberdade de movimento para os usuários, característica das redes sem fio; e alocação flexível de banda e qualidade de serviço garantida, características das redes ATM com fio. Além disso, o uso do ATM na rede sem fio facilita o processo de integração deste tipo de rede com o *backbone* das operadoras de telecomunicações. O conceito de redes ATM sem fio foi inicialmente proposto em 1992 [1]. Várias atividades de pesquisa e desenvolvimento sobre este tipo de rede vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos. Alguns exemplos são: WATMnet, desenvolvido pela NEC [1]; projeto Magic WAND, desenvolvido pela European Union ACTS (Advanced Communications Technologies and Services) [2]; e o projeto BAHAMA, desenvolvido pelos laboratórios Bell [3].

Um dos principais problemas de se utilizar o ATM em redes sem fio está relacionado à taxa de erro no enlace sem fio. O enlace sem fio pode ser extremamente ruidoso e ter comportamento variante com o tempo, resultando em taxa de erro de bit elevada e variável. A tecnologia ATM, por sua vez, foi concebida vislumbrando-se a fibra óptica como meio de transmissão, com taxa de erro de bit extremamente baixa. Para contornar este problema, mecanismos adicionais de controle de erro devem ser incluídos no enlace ATM sem fio. Os esquemas tradicionais de controle de erro são a correção por solicitação de retransmissão por parte do receptor do enlace sem fio (ARQ – Automatic Repeat Request) e a correção direta no receptor do enlace sem fio (FEC – Forward Error Correction). Vários artigos abordando estas questões já foram publicados [4,5,6].

O uso de FEC ou ARQ no enlace sem fio da rede ATM tem as seguintes características:

- Diminuição da taxa de erro de bit residual (taxa de erro de bit após a aplicação do mecanismo de controle de erro);
- Aumento do atraso para transmissão dos pacotes de informação e diminuição da vazão, devido ao *overhead* dos mecanismos de controle de erro.

Neste artigo compara-se, analiticamente, o FEC e o ARQ no ambiente das redes ATM sem fio considerando-se aplicações em tempo real, onde se define um valor máximo de atraso que as

células podem sofrer (max-CTD – Maximum Cell Transfer Delay) e um valor máximo de variação deste atraso (PP-CDV – Peak-to-peak Cell Delay Variation). As comparações são feitas com base nos seguintes parâmetros:

- vazão no enlace sem fio;
- taxa de células contendo erro, após o mecanismo de controle do enlace sem fio (erro residual);
- atraso médio e máximo de cada pacote de informação;

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: na próxima seção descreve-se o cenário de referência do sistema analisado e as suposições feitas; na seção 3 o desempenho do sistema ARQ é modelado; na seção 4 analisa-se o desempenho do sistema FEC; a seção 5 contém as conclusões quanto ao desempenho comparativo dos dois sistemas.

2. CENÁRIO DE REFERÊNCIA

O sistema de referência é composto de um enlace sem fio e L enlaces ópticos, como mostra a Figura 1. No enlace sem fio, uma estação rádio-base é compartilhada por vários terminais, em um esquema de múltiplo acesso. A taxa de erro de bit para os enlaces ópticos foi fixada em 10^{-8} ; para o enlace sem fio considerou-se uma taxa de erro de bit compreendida entre 10^{-2} e 10^{-5} .

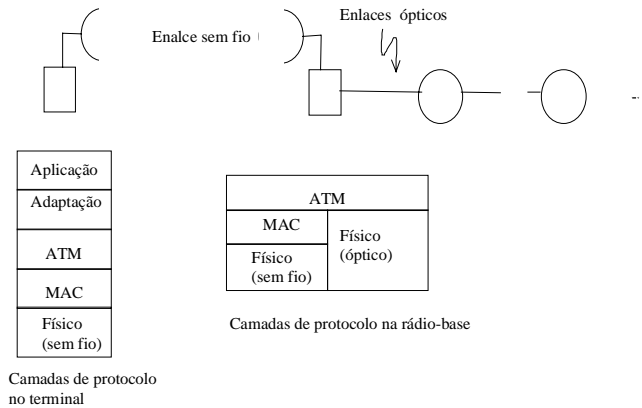


Figura 1. Cenário de referência para a análise de desempenho e as camadas de protocolo do enlace sem fio.

Supôs-se que a técnica de múltiplo acesso utilizada é a DAMA-TDMA (Demand Allocation Multiple Access – Time Division Multiple Access). Nesta técnica, o tempo é dividido em quadros, que são subdivididos em dois períodos denominados de *uplink* e *downlink*. No período de *downlink* a estação rádio-base transmite para os terminais utilizando multiplexagem por divisão de tempo. O período de *uplink* é dividido em um período de reserva e um período de transmissão. Os terminais transmitem requisições no período de reserva, utilizando alguma técnica de múltiplo acesso aleatório (como por exemplo o Reservation Aloha), e, quando autorizados pela rádio-base, transmitem seus dados no período de transmissão, utilizando TDMA. As janelas de tempo do período de transmissão comportam a transmissão de uma célula ATM e do *overhead* da

camada MAC. A Figura 2 ilustra um quadro no enlace sem fio e suas subdivisões.

Os atrasos fim-a-fim de uma célula consideram apenas a transmissão das células no enlace sem fio (incluindo o *overhead* da camada MAC) e nos enlaces ópticos, o tempo de propagação total, e o tempo perdido com retransmissões (no caso do sistema ARQ). Outros tempos, tais como o tempo necessário para se obter o direito de transmissão no enlace sem fio e os atrasos de comutação e enfileiramento nos comutadores ATM, não são considerados, uma vez que estes atrasos afetam igualmente os dois sistemas analisados.

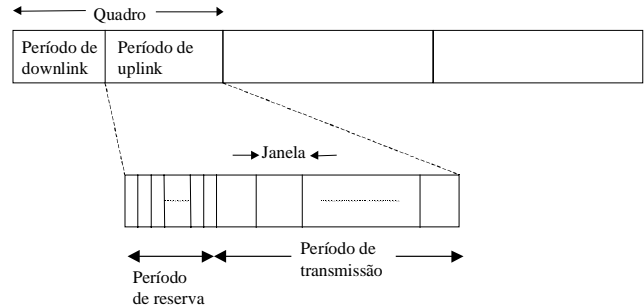


Figura 2. Estrutura do quadro no enlace sem fio.

As seguintes considerações e suposições foram feitas:

- Em qualquer parâmetro utilizado, o subíndice f indica que o parâmetro está associado ao sistema FEC, e o subíndice a indica que o parâmetro está associado ao sistema ARQ. O uso simultâneo dos dois subíndices indica que o parâmetro é dependente do sistema considerado. A ausência de subíndice indica que o parâmetro é comum aos dois sistemas.
- P_b é a taxa de erro de bit no enlace sem fio, e varia entre 10^{-2} e 10^{-5} .
- P_o é a taxa de erro de bit nos enlaces ópticos, e é fixada em 10^{-8} .
- No enlace sem fio os terminais transmitem apenas uma célula ATM por quadro.
- O comprimento de uma janela no enlace sem fio é $n_{f,a} = 424 + X + Y_{f,a}$ bits, onde $X = 16$ é o comprimento do cabeçalho MAC e $Y_{f,a}$ é o comprimento do trailer MAC (bits de paridade para controle de erro no enlace sem fio).
- Os códigos utilizados para controle de erro são códigos de bloco (n,k) , com o valor de k fixado em 440.
- A técnica de entrelaçamento é utilizada para aleatorizar as rajadas de erro no canal.
- R_w é a taxa de transmissão no enlace sem fio, e R_o é a taxa de transmissão no enlace óptico, supostos iguais a 155 Mbps nos exemplos numéricos.
- τ_w é o tempo de propagação no enlace sem fio, e τ_o é o tempo de propagação em um enlace óptico. Nos exemplos numéricos adotou-se 33 e 330 μs , respectivamente, para estes parâmetros.

- $P_{CWf,a}$ é a probabilidade de uma célula não conter erro após o mecanismo de controle de erro do enlace sem fio.
- $P_{CTf,a}$ é a probabilidade de uma célula chegar ao destino, após os enlaces com fio, sem conter erro. As análises foram feitas para os valores 0.999 e 0.9999.
- $T_{Wf,a}$ é o atraso médio de uma célula no enlace sem fio.
- $T_{Tf,a}$ é o atraso médio fim-a-fim de uma célula, considerando-se o enlace sem fio e os enlaces ópticos.

3. ANÁLISE DO SISTEMA ARQ

No caso de se utilizar ARQ no enlace sem fio, para sistemas em tempo real, deve-se limitar o número máximo de retransmissões, denotado por x , para que o atraso da célula não fique excessivo.

A cada célula recebida na rádio-base tem-se três situações possíveis: a célula chega sem erro; a célula chega com erro detectável; a célula chega com erro não-detectável.

Uma célula sai do enlace sem fio contendo erro em duas situações: a célula chega à rádio-base contendo erro não-detectável; a célula chega à rádio-base contendo erro detectável, mas o limite x de retransmissões foi alcançado.

A probabilidade de uma célula sair do enlace sem fio contendo erro residual pode ser calculada por

$$P_{EWa} = \left(P_{EEW} \cdot \sum_{j=0}^x P_{EW}^j \right) + P_{EW}^{x+1} \quad (1)$$

onde, P_{EEW} representa a probabilidade da célula chegar à rádio-base com um erro não-detectável, e P_{EW} representa a probabilidade da célula chegar à rádio-base com um erro detectável.

Para o cálculo de P_{EEW} utiliza-se o limitante de Korzhik [7]:

$$P_{EEW} = 2^{-(n-k)} \cdot \left[1 - (1 - P_b)^{n_a} \right] \quad (2)$$

A probabilidade P_C de uma célula chegar sem erro no enlace sem fio, em um dado quadro, é calculada por

$$P_C = (1 - P_b)^{n_a} \quad (3)$$

O valor de P_{EW} é obtido da relação

$$P_{EW} = 1 - P_{EEW} - P_C \quad (4)$$

A probabilidade de uma célula não conter erro após o mecanismo de controle de erro do enlace sem fio é dada por

$$P_{CWa} = 1 - P_{EWa} \quad (5)$$

e a probabilidade de uma célula não conter erro no destino é dada por

$$P_{CTa} = P_{CWa} \cdot P_{CO}^L \quad (6)$$

onde P_{CO} é a probabilidade de uma célula não conter erro ao final de um enlace óptico isolado, e é calculada por

$$P_{CO} \equiv (1 - P_o)^{384} \quad (7)$$

A vazão do sistema ARQ pode ser calculada por

$$\eta = \frac{k}{n_a \cdot N_X} \quad (8)$$

onde N_X é o número médio de transmissões de cada célula no enlace sem fio, sendo dado por

$$N_X = \sum_{j=1}^x j \cdot P_{EW}^{j-1} \cdot (P_C + P_{EEW}) + (x+1) \cdot P_{EW}^x \quad (9)$$

O atraso médio fim-a-fim de uma célula é dado por

$$T_{Ta} = \left\{ (P_C + P_{EEW}) \cdot \sum_{j=1}^x \left[(j-1) \cdot T_Q + \frac{n_a}{R_W} \right] \cdot P_{EW}^{j-1} \right\} + \left(x \cdot T_Q + \frac{n_a}{R_W} \right) \cdot P_{EW}^x + T_{fixo} \quad (10)$$

onde T_Q é o tempo de quadro no enlace sem fio, considerado igual a $20n_a/R_W$ nos exemplos numéricos, e T_{fixo} é a parcela dependente dos tempos de propagação, do número de enlaces e da taxa de transmissão da parte óptica da rede, sendo dado por

$$T_{fixo} = \tau_W + L \cdot \frac{424}{R_O} + L \cdot \tau_O \quad (11)$$

Nos exemplos numéricos adotou-se $L = 5$, resultando em $T_{fixo} = 1.696$ ms.

O atraso máximo fim-a-fim de uma célula é dado por

$$T_{Ma} = x \cdot T_Q + \frac{n_a}{R_W} + T_{fixo} \quad (12)$$

3.1 Código para o Sistema ARQ

A definição do código de detecção de erro apropriado depende do compromisso entre o número máximo de retransmissões (x) e a redundância do código ($n-k$): à medida em que se aumenta o valor de x , pode-se diminuir a redundância do código, e vice-versa. No entanto, existe um valor mínimo de x , abaixo do qual não é possível alcançar os valores de P_{CTa} desejados, independentemente do quanto se aumente a redundância; assim como existe um valor mínimo de n , abaixo do qual não se consegue alcançar os valores de P_{CTa} desejados, independentemente do quanto se aumente o valor de x . Estes valores e o valor máximo de x , que está relacionado ao máximo atraso tolerado pela aplicação em tempo real, são limitantes para a definição do código.

Assim, para cada probabilidade de erro de bit do canal rádio, pode-se ter várias soluções possíveis. Para encontrar a melhor solução para cada caso a seguinte metodologia é proposta:

- Fixa-se os valores de P_b e P_{CTa} desejados.
- Através das expressões (1) a (6), encontra-se o mínimo valor de x possível, independentemente do valor de n , e o mínimo valor de n possível, independente do valor de x .
- Para as soluções possíveis dentro destes dois limites, os valores de vazão e atraso médio são calculados.
- Expurga-se as soluções cujo valor de atraso médio e máximo ultrapasse os limites estabelecidos pela aplicação.
- Com base nas soluções remanescentes, define-se o código para o esquema ARQ.

A seguir apresenta-se a aplicação da metodologia proposta para um caso particular, onde os seguintes parâmetros foram adotados:

- $P_b = 10^{-3}$
- $P_{CTa} = 0.999$

Das expressões (6) e (7) encontra-se $P_{Cwa} = 0.999019$. Utilizando as expressões (1) a (5) pode-se determinar o valor mínimo de n_a e o valor mínimo de x .

A Figura 3 mostra os valores obtidos para P_{Cwa} em função de x , para alguns valores de n_a . Observa-se que o valor mínimo de n_a , para $P_{Cwa} \geq 0.999019$, é 450, independente do valor de x .

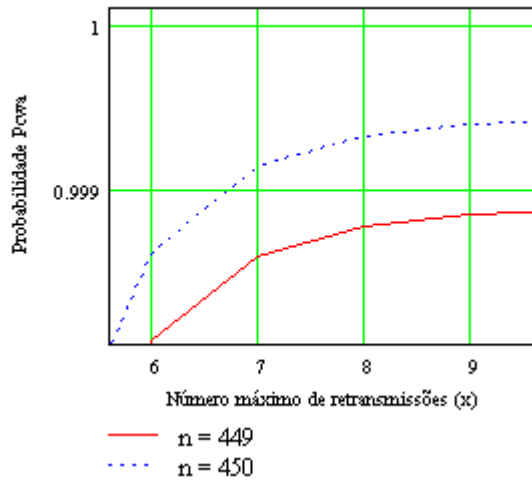


Figura 3. Análise do valor mínimo de n_a .

A Figura 4 mostra os valores obtidos para P_{Cwa} , em função de n_a , para alguns valores de x . Observa-se que o valor mínimo de x , para $P_{Cwa} \geq 0.999019$, é 6, independente do valor de n_a .

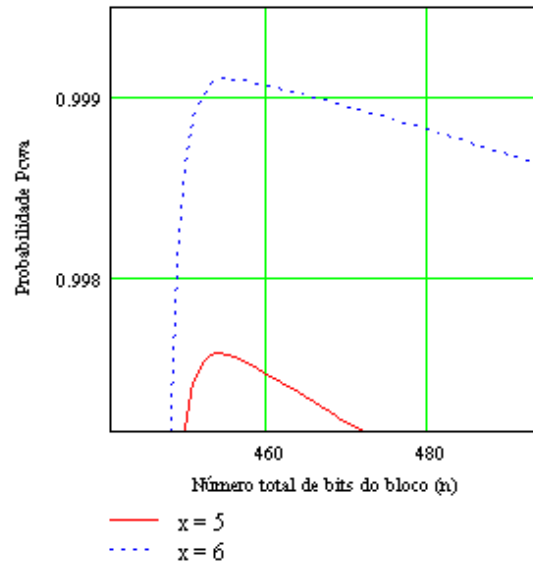


Figura 4. Análise do valor mínimo de x .

Determinados os valores mínimos de x e n_a , pode-se definir os códigos capazes de atender o limite mínimo imposto para P_{Cwa} . A Figura 5 mostra algumas soluções possíveis. O uso do código (453,440) resulta em $P_{Cwa} \geq 0.999019$ para $x = 6$. Como o valor mínimo de x é 6, soluções com valor de n_a superior a 453 resultam em maior redundância sem nenhum ganho, e são portanto descartadas. Os códigos (450,440), (451,440) e (452,440) precisam de $x = 7$ para alcançar $P_{Cwa} \geq 0.999019$; a escolha natural é o código (450,440), que possui menor redundância.

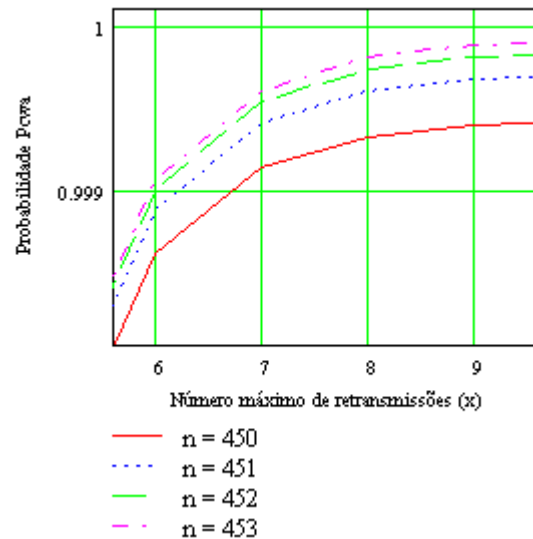


Figura 5. Análise de alguns códigos possíveis.

A seguir, utilizando-se as expressões (08) a (12), avalia-se a vazão e o atraso obtidos para os dois códigos selecionados:

(450,440) com $x = 7$ e (453,440) com $x = 6$. Os resultados estão apresentados na Tabela 1, onde os atrasos representam apenas a componente do enlace sem fio. O atraso total pode ser obtido somando-se a componente fixa, 1.696 ms, aos valores apresentados.

| | (450,440) | (453,440) |
|--------------------------|-----------|-----------|
| Vazão | 0.6238 | 0.6179 |
| No médio de transmissões | 1.5673 | 1.5719 |
| Atraso médio (μ s) | 347 | 353 |
| Atraso máximo (μ s) | 4083 | 3526 |

Tabela 1. Resultados do sistema ARQ para os códigos (450,440) e (453,440)

Observa-se que os códigos possuem desempenho muito semelhantes, com o código (450,440) apresentando ligeira vantagem, em termos de vazão e atraso médio, e pequena desvantagem em termos de atraso máximo. Admitindo que os atrasos máximos não ultrapassam os limites da aplicação, escolhe-se o código (450,440) com $x = 7$.

Para completar a análise para o sistema ARQ, aplicou-se a metodologia proposta para cada par de valor (P_b, P_{CTa}) desejado, mantendo-se o valor dos demais parâmetros. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2, onde os atrasos representam apenas a parcela devida ao enlace sem fio. O atraso total pode ser obtido somando-se a componente fixa aos valores apresentados.

Para $P_b = 10^{-5}$ e $P_b = 10^{-4}$, um único código satisfaz simultaneamente as condições de x e n_a mínimo; Para $P_b = 10^{-3}$, as condições de x e n_a mínimo são satisfeitas por soluções muito semelhantes (em termos de redundância, número máximo de retransmissões, vazão e atrasos); neste caso optou-se pelo código com maior vazão. Para $P_b = 10^{-2}$, as soluções para x e n_a mínimo são semelhantes em termos de redundância, mas apresentam diferenças em termos de número máximo de retransmissões. Neste caso, os dois resultados estão apresentados na tabela; ambos apresentam vazão muito pequena e atraso máximo muito elevado.

| P_b | $P_{CTa} \geq$ | Código | Vazão | Número médio de transmissões | Atraso médio/máximo (μ s) |
|-----------|----------------|-----------------------|--------|------------------------------|--------------------------------|
| 10^{-5} | 0.9990 | (443,440), $x = 1$ | 0.9894 | 1.0039 | 18/75 |
| 10^{-5} | 0.9999 | (446,440), $x = 2$ | 0.9822 | 1.0044 | 18/133 |
| 10^{-4} | 0.9990 | (446,440), $x = 2$ | 0.9443 | 1.045 | 21/133 |
| 10^{-4} | 0.9999 | (450,440), $x = 3$ | 0.9348 | 1.046 | 21/192 |

| | | | | | |
|-----------|--------|--|--------|--------|----------------|
| 10^{-3} | 0.9990 | (450,440), $x = 7$ | 0.6238 | 1.567 | 51/425 |
| 10^{-3} | 0.9999 | (453,440), $x = 11$ | 0.6174 | 1.573 | 52/661 |
| 10^{-2} | 0.9990 | (457,440), $x = 820$, mínimo n | 0.0098 | 98.69 | 5779/ 48364 |
| 10^{-2} | 0.9990 | (460,440), $x = 712$, mínimo x | 0.0094 | 101.72 | 5996/ 42274 |
| 10^{-2} | 0.9999 | (460,440), $x = 1332$, mínimo x | 0.0094 | 101.80 | 6001/ 79074 |
| 10^{-2} | 0.9999 | (463,440), $x = 977$, mínimo x | 0.0091 | 104.92 | 6227/ 58384 |

Tabela 2. Resultados para o sistema ARQ

4. ANÁLISE DO SISTEMA FEC

Considera-se a utilização de códigos BCH (Bose, Chaudhuri e Hocquenghem), que são uma classe de códigos cíclicos com grande capacidade de correção de erros aleatórios. Para quaisquer inteiros positivos m ($m \geq 3$) e t ($t < 2m-1$), existe um código binário BCH, com capacidade de corrigir t bits errados, com os seguintes parâmetros [8]:

- Comprimento do bloco: $n = 2m - 1$.
- Número de bits de paridade: $n - k \leq mt$.
- Distância mínima: $d_{min} \geq 2t + 1$.

No sistema proposto os blocos tem sempre $k = 440$ bits de informação (célula ATM). Quando se fixa o valor de k , é comum ter-se de trabalhar com códigos encurtados, que podem ser obtidos subtraindo-se o número apropriado de bits, mantendo-se $n - k$, do código natural.

Para um código com capacidade de corrigir t bits errados, a probabilidade de uma célula não conter erros, após a decodificação, é dada por

$$P_{CWf} = \sum_{j=0}^t \binom{n_f}{j} P_b^j \cdot (1 - P_b)^{n_f - j} \quad (13)$$

Considerando-se os enlaces ópticos, a probabilidade de uma célula chegar ao destino sem conter erros é dada por

$$P_{CTf} = P_{CWf} \cdot P_{CO}^L \quad (14)$$

Fixando-se um valor aceitável para P_{CTf} , pode-se determinar, através das expressões (13) e (14) e das propriedades do código BCH, a redundância mínima necessária ao código. A vazão obtida no enlace sem fio é limitada por esta redundância, e pode ser calculada por

$$\eta = \frac{k}{n_f} \quad (15)$$

O atraso fim-a-fim de uma célula é dado por

$$T_{Tf} = \frac{n_f}{R_W} + T_{fixo} \quad (16)$$

Fixando-se todos os parâmetros necessários à análise com os mesmos valores utilizados para o sistema operando com ARQ obtém-se os resultados apresentados na Tabela 3, onde os atrasos representam apenas a parcela devida ao enlace sem fio.

| P _b | P _{CTF} ≥ | Código | Vazão | Atrasos médio e máximo, em (μs) |
|------------------|--------------------|-----------|--------|---------------------------------|
| 10 ⁻⁵ | 0.9990 | (449,440) | 0.9800 | 19 |
| 10 ⁻⁵ | 0.9999 | (449,440) | 0.9800 | 19 |
| 10 ⁻⁴ | 0.9990 | (449,440) | 0.9800 | 19 |
| 10 ⁻⁴ | 0.9999 | (458,440) | 0.9607 | 19 |
| 10 ⁻³ | 0.9990 | (476,440) | 0.9244 | 19 |
| 10 ⁻³ | 0.9999 | (485,440) | 0.9072 | 19 |
| 10 ⁻² | 0.9990 | (580,440) | 0.7586 | 20 |
| 10 ⁻² | 0.9999 | (610,440) | 0.7213 | 20 |

Tabela 3. Resultados para o sistema FEC

5. CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas tem-se as seguintes conclusões:

- No sistema FEC o atraso de uma célula é praticamente independente da taxa de erro de bit no canal rádio, pois a diferença da redundância necessária, na maior e a na menor probabilidade de erro de bit, é muito pequena.
- Os atrasos médio e máximo variam significativamente com a taxa de erro de bit no canal rádio para o sistema ARQ. Isto se deve à grande variação, com a taxa de erro, no número médio e máximo de retransmissões neste sistema.
- O tempo de quadro pode influenciar significativamente o atraso no sistema ARQ, particularmente para taxas de erro elevadas no canal rádio.
- O sistema FEC possui desempenho superior ao sistema ARQ se a taxa de erro de bit no canal rádio é maior que 10⁻⁵.
- Para taxas de erro de bit no canal rádio baixas (10⁻⁵), o sistema ARQ apresenta maior vazão e menor atraso médio que o sistema FEC, mas a diferença de desempenho não é significativa.

6. REFERÊNCIAS

- [1] D. Raychaudhuri, L. J. French, R. J. Siracusa, S. k. Biswas, R. Yuan, P. Narasimhan and C. A. Johnston, "WATMnet: A Prototype Wireless ATM System for Multimedia Personal Communication", ", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, VOL. 15, NO. 1, pp. 83-95, Jan. 1997.
- [2] J. Mikkonen, J. Aldis, G. Awater, A. Lunn and D. Hutchison, "The Magic WAND-Functional Overview", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, VOL. 16, NO. 6, pp. 953-972, August 1998.
- [3] E. Ayanoglu, K. Y. Eng and M. J. Karol, "Wireless ATM: Limits, Challenges, and Proposals" IEEE Personal Communications, pp. 18-33, August 1996.
- [4] I. Joe, "A Novel Adaptive Hybrid ARQ Scheme for Wireless ATM Networks", Wireless Networks, Vol. 6, 2000, pp 211-219.
- [5] K. Yamada, H. Okada, T. H. Lai, "An Integrated Dynamic Error Control Scheme for Wireless ATM Networks", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E82-A, No 7, July 1999, pp 1261-1268.
- [6] M. Barton, L.F. Chang, "Error Protection for ATM-based Wireless Networking Systems", J. High Speed Netw, Vol. 8, No 2, 1999, pp 87-100.
- [7] S. G. Wilson, Digital Modulation and Coding, Prentice-Hall, 1996.
- [8] S. Lin, D. J. Costello Jr., Error Control Coding: Fundamentals and Applications, Prentice-Hall, 1983.