

Modelagem de Redes Bluetooth em Canais com Desvanecimento Nakagami- m

João H. Kleinschmidt, Marcelo E. Pellenz e Luiz A. de Paula Lima Jr.

Resumo — Bluetooth é uma tecnologia de transmissão sem fio desenvolvida para redes de comunicação pessoal de curta distância (WPANs), com promissoras aplicações em redes ad-hoc e redes de sensores. Neste trabalho modelamos e calculamos o desempenho de enlaces Bluetooth em canais com desvanecimento Nakagami- m , considerando os pacotes de transmissão assíncronos. A distribuição de Nakagami permite modelar diferentes condições de desvanecimento através do parâmetro m . Os modelos derivados para a probabilidade de erro de pacote foram incorporados à ferramenta de simulação de redes Bluetooth baseada no NS-2, denominada Blueware.

Palavras-Chave — Bluetooth, desvanecimento Nakagami- m , redes sem fio.

Abstract — Bluetooth is a wireless transmission technology developed for short-range personal communication networks (WPAN), with promising applications in the field of ad-hoc and sensor networks. This work models and evaluates the performance of Bluetooth links in Nakagami- m fading channels for asynchronous packets. The Nakagami distribution can model different fading intensities through parameter m . The models derived for the packet error rate were incorporated into Blueware – a simulation tool for Bluetooth networks based in NS-2.

Index terms — Bluetooth, Nakagami- m fading, wireless networks.

I. INTRODUÇÃO

Bluetooth [1] é uma tecnologia emergente desenvolvida para redes sem fio de comunicação pessoal de curta distância (WPAN). Os dispositivos Bluetooth operam na banda de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4GHz utilizando a técnica de espalhamento espectral com saltos de frequência. A taxa de transmissão em enlaces Bluetooth chega a 1 Mbps, usando modulação GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*). O protocolo MAC do Bluetooth foi projetado para facilitar a formação de redes ad-hoc. Os dispositivos podem se comunicar formando uma rede de até oito nós, chamada de *piconet*. Numa *piconet*, um dispositivo assume o papel de mestre e os outros de escravos. Dispositivos em diferentes *piconets* podem se comunicar usando uma estrutura chamada *scatternet*. O canal é dividido em quadros de tempo (*Time Slots*) de 625 μ s. Um esquema TDD (*Time-Division Duplex*) é usado para operação bidirecional. Para transmissão de dados são implementados sete tipos de pacotes assíncronos, como mostra a Tabela 1.

João H. Kleinschmidt, Marcelo E. Pellenz e Luiz A. de Paula Lima Jr, Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Brasil, E-mails: {joahk, marcelo, laplima} @ppgia.pucpr.br.

Todos os pacotes usam código de redundância cíclica (CRC) e retransmissão, exceto o pacote AUX1, onde estratégias específicas de controle de erros podem ser aplicadas [2]. Cada pacote ocupa 1, 3 ou 5 quadros de tempo. Um pacote é formado por um código de acesso de 72 bits, um cabeçalho de 18 bits e os dados (*payload*) serem transmitidos, de tamanho variável. O cabeçalho é protegido por um código de repetição (3,1) com capacidade de correção de um erro. Os dados possuem CRC para detecção de erro e ainda são protegidos por um código de Hamming (15,10) nos pacotes DM1, DM3 e DM5. Os dispositivos Bluetooth são classificados em três classes de potência, como mostra a Tabela 2. A classe 3 atinge até 10 metros e a classe 1 atinge até 100 metros, permitindo a aplicação da tecnologia Bluetooth em sistemas de telemetria, redes de sensores e outras aplicações que precisam cobrir grandes distâncias.

TABELA 1. TIPOS DE PACOTES ASSÍNCRONOS

Tipo de Pacote	Time Slots	Payload (bytes)	Codificação do Payload	Número total de bits	Máxima Taxa de Transmissão Assimétrica (kbps)	
					Direto	Reverso
DM1	1	18	(15,10)	240	108.8	108.8
DH1	1	28	-	240	172.8	172.8
DM3	3	123	(15,10)	1500	387.2	54.4
DH3	3	185	-	1496	585.6	86.4
DM5	5	226	(15,10)	2736	477.8	36.3
DH5	5	341	-	2744	723.2	57.6
AUX1	1	30	-	240	185.6	185.6

TABELA 2. CLASSES DE POTÊNCIA DOS DISPOSITIVOS

Classe de Potência	Potência Máxima	Potência Mínima
1	100 mW (20 dBm)	1 mW (0 dBm)
2	2.5 mW (4 dBm)	0.25 mW (-6 dBm)
3	1 mW (0 dBm)	N/A

A vazão de enlaces Bluetooth para os pacotes assíncronos foi calculada em [3] para o canal Gaussiano (AWGN) e para um canal com desvanecimento Rayleigh. Este trabalho analisa o desempenho de enlaces Bluetooth em canais com desvanecimento Nakagami [4]. A distribuição de Nakagami é amplamente usada para avaliar o desempenho de sistemas de comunicações móveis e sem fio, pois possibilita uma ampla variabilidade das condições de desvanecimento e tem uma boa aproximação com dados reais de medição. A distribuição de Nakagami modela estatisticamente as variações rápidas da envoltória do sinal recebido, causadas por movimentações no ambiente ou dos próprios nós da rede. Ela pode ser reduzida para uma distribuição Rayleigh (quando $m = 1$) ou modelar condições de desvanecimento mais severas ($m < 1$) ou menos

severas ($m > 1$) que Rayleigh. Quando $m \rightarrow \infty$, o desvanecimento de Nakagami converge para um canal AWGN. Para $m \geq 1$, um mapeamento entre o parâmetro de desvanecimento m e o fator K de Rician permite uma aproximação da distribuição Rice. Uma questão importante em redes Bluetooth é a interferência causada por outros nós Bluetooth e dispositivos que operam na mesma banda, como telefones sem fio, forno de microondas e o padrão IEEE 802.11b para redes locais sem fio (WLANs). O parâmetro m de Nakagami permite estimar a qualidade do canal, englobando os efeitos de desvanecimento e interferência. Na modelagem proposta para o canal de rádio é também considerado um modelo de perda de percurso logarítmico [5]. As taxas de erro de pacotes do canal direto e reverso são calculadas em função da distância entre os dispositivos na rede. Estes resultados são incorporados no software de simulação Blueware [6,7] para análise de desempenho de scatternets.

O artigo está estruturado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta o cálculo da vazão (*throughput*) e das taxas de erro de pacote para canais com desvanecimento Nakagami. Na Seção 3, o modelo logarítmico de perda de percurso é aplicado para relacionar as taxas de erro de pacote com as distâncias entre os nós. Algumas considerações sobre o parâmetro m são feitas na Seção 4. A Seção 5 mostra alguns cenários de simulação com desvanecimento Nakagami. Finalmente, a Seção 6 traz as considerações finais.

II. CÁLCULO DE VAZÃO EM CANAIS COM DESVANECIMENTO NAKAGAMI- m

Para análise da vazão foi utilizada a modelagem descrita em [3]. A vazão pode ser calculada usando a probabilidade de retransmissão dos pacotes. A retransmissão de um pacote de dados (assíncrono) ocorre quando qualquer um dos cinco eventos acontece:

A: o destino falha em sincronizar com o código de acesso do pacote enviado;

B: o cabeçalho do pacote enviado está corrompido (depois que o código de repetição é decodificado);

C: os dados do pacote enviado estão corrompidos depois que o código de Hamming é decodificado, causando a falha na verificação de CRC;

D: a fonte é incapaz de sincronizar com o código de acesso do pacote de retorno;

E: o cabeçalho do pacote de retorno está corrompido.

Considerando que o evento \bar{A} indica o complemento do evento A , $P[A]$ é a probabilidade de ocorrência do evento A e assim sucessivamente, a probabilidade de retransmissão de um pacote é dada por

$$P_r(\bar{\gamma}_f, \bar{\gamma}_r) = 1 - \int_0^\infty f(\gamma_f) P[\bar{A}] P[\bar{B}] P[\bar{C}] d\gamma_f \cdot \int_0^\infty f(\gamma_r) P[\bar{D}] P[\bar{E}] d\gamma_r \quad (1)$$

onde $\bar{\gamma}_f$ e $\bar{\gamma}_r$ são a relação sinal-ruído (SNR) média recebida nos canais direto e reverso e $f(\gamma_f)$ e $f(\gamma_r)$ são as funções de densidade de probabilidade (*pdf*) de γ_f e γ_r . A

SNR média recebida é função do modelo de perda de percurso a distância entre os nós. As expressões analíticas para as probabilidades de retransmissão foram derivadas em [3]. Da equação (1) pode-se definir a taxa de erro de pacote (PER) do canal direto, $PER_f(\bar{\gamma}_f)$, e reverso, $PER_r(\bar{\gamma}_r)$,

$$PER_f(\bar{\gamma}_f) = 1 - \int_0^\infty f(\gamma_f) P[\bar{A}] P[\bar{B}] P[\bar{C}] d\gamma_f, \quad (2)$$

$$PER_r(\bar{\gamma}_r) = 1 - \int_0^\infty f(\gamma_r) P[\bar{D}] P[\bar{E}] d\gamma_r. \quad (3)$$

A taxa de dados R é dada por

$$R = \frac{K}{D \cdot N \cdot 625 \cdot 10^{-6}}, \quad (4)$$

onde D é o número de quadros de tempo ocupados por transmissão incluindo o pacote de retorno, K é o número de bits de dados do pacote e N é uma variável aleatória que representa o número total de vezes que um pacote é transmitido. A vazão média é encontrada pelo valor médio esperado de R em relação a N

$$\bar{R} = E\{R\} = \sum_{N=1}^{\infty} [1 - P_r(\bar{\gamma}_f, \bar{\gamma}_r)] \cdot [P_r(\bar{\gamma}_f, \bar{\gamma}_r)]^{N-1} \cdot R \quad (5)$$

A função de densidade de probabilidade de Nakagami- m [4] é dada por

$$f(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\Gamma(m) \bar{\gamma}^m} \cdot \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \quad m \geq 0.5 \quad (6)$$

Substituindo a equação (6) em (1), a vazão pode ser calculada usando (5) para diferentes valores de m . Foi considerado como índice de modulação GFSK $h=0.32$ e um limiar $T=65$. O parâmetro T é o número mínimo de bits do código de acesso que devem ser corretamente demodulados para a sincronização.

As Figuras 1 a 4 mostram a vazão para os pacotes DM1, DH1, DM5 e DH5 para diferentes valores de m . As curvas apresentam comportamento similar, mas a vazão máxima é função do tipo de pacote. Para $m=0.5$ o desvanecimento é mais severo, reduzindo a vazão dos enlaces. As curvas de vazão para pacotes DM3 e DH3 segue o mesmo comportamento e foram omitidas do trabalho. As Figuras 5 a 8 apresentam os resultados de vazão em função da taxa de erro de pacote (PER) do canal direto e reverso para $m=0.5$ e $m=1.5$.

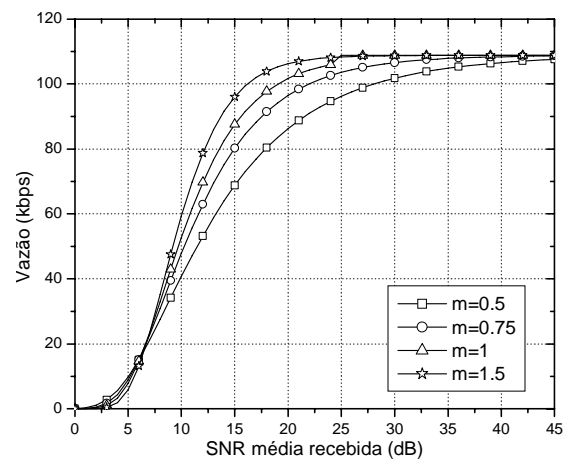


Fig. 1. Desempenho do pacote DM1

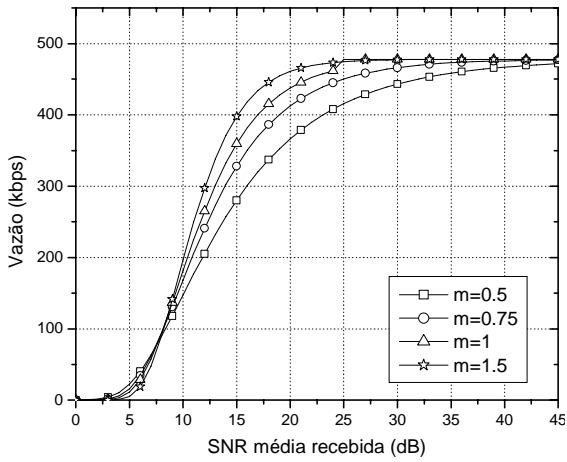


Fig. 2. Desempenho do pacote DM5

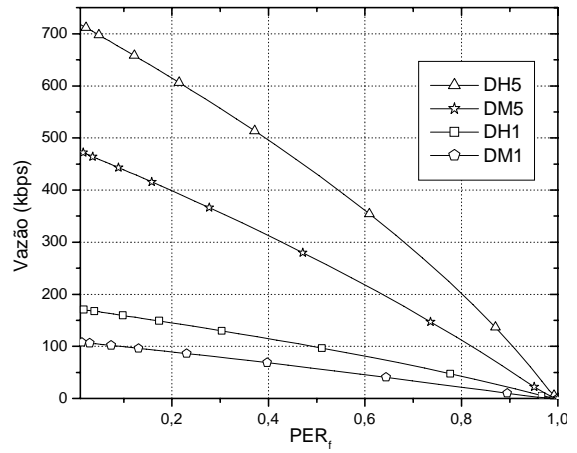


Fig. 5. Vazão x PER_f para $m=0.5$

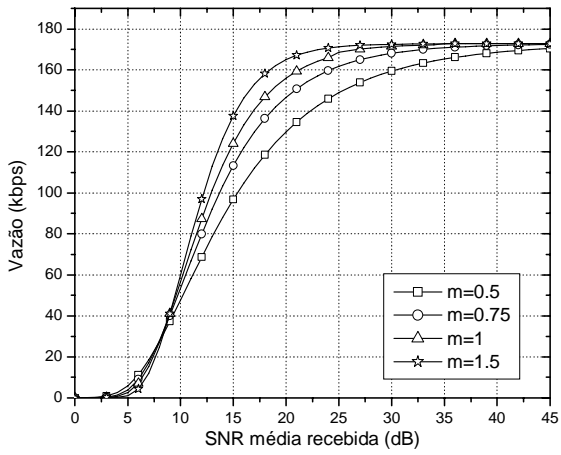


Fig. 3. Desempenho do pacote DH1

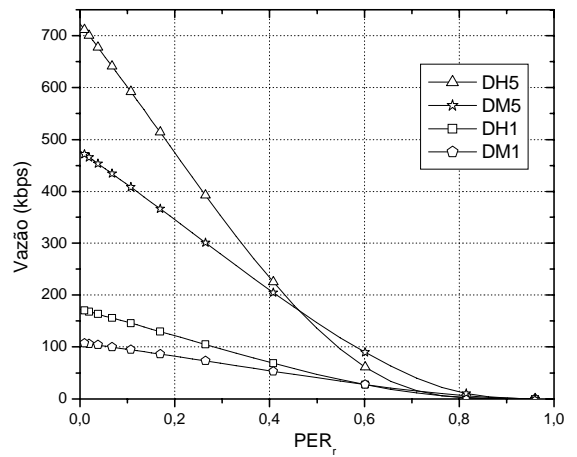


Fig. 6. Vazão x PER_f para $m=0.5$

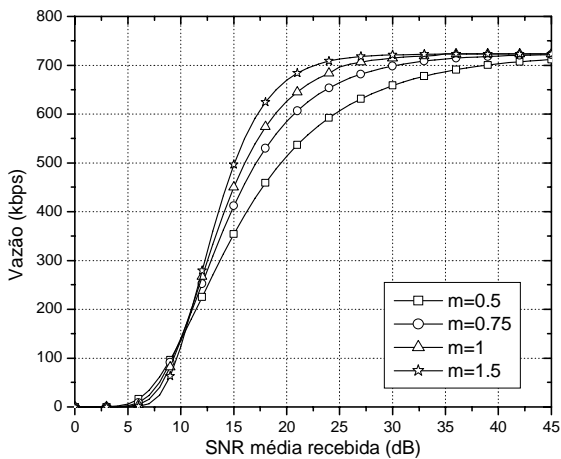


Fig. 4. Desempenho do pacote DH5

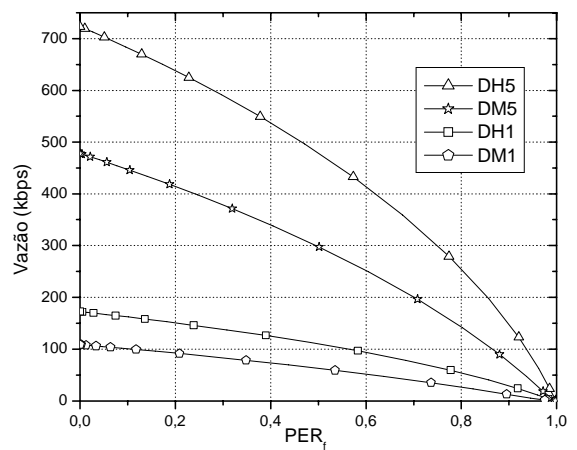
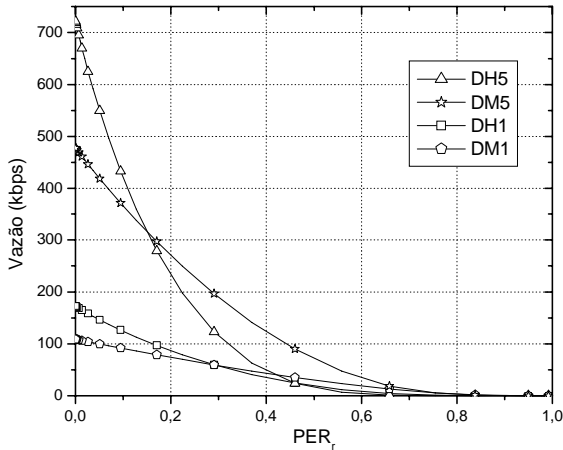


Fig. 7. Vazão x PER_f para $m=1.5$

Fig. 8. Vazão \times PER_r para $m=1.5$

III. MODELO DE PERDA DE PERCURSO

Para estimar a potência média recebida por dispositivos Bluetooth foi aplicado o modelo logarítmico de perda de percurso [5]. No cálculo da perda de percurso foi sempre considerada a potência máxima transmitida para cada classe de potência do Bluetooth. O modelo logarítmico de perda de percurso é dado por

$$\overline{PL}(\text{dB}) = \overline{PL}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log(d/d_0), \quad (7)$$

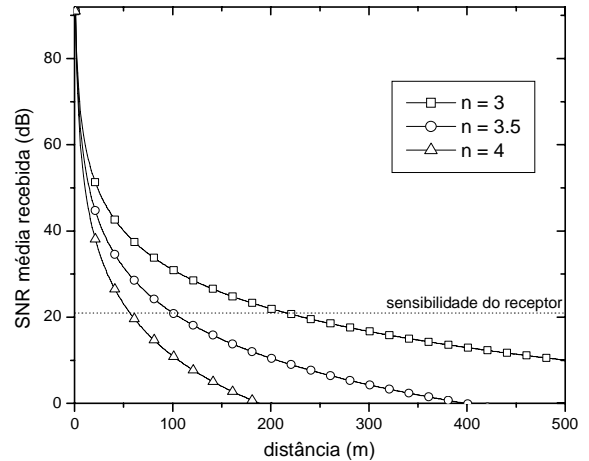
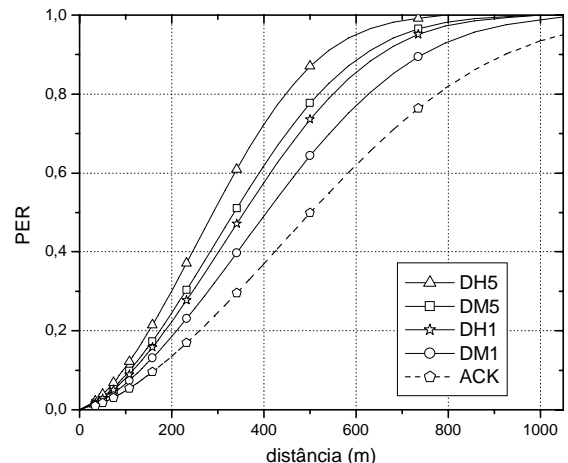
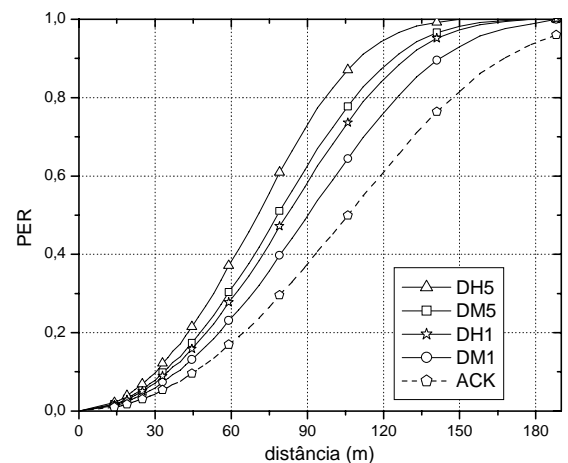
onde n é o expoente de perda de percurso que indica a proporção em que a perda aumenta com a distância, d é a separação transmissor-receptor e d_0 é a distância de referência. O valor de n pode ser escolhido baseado no ambiente que os dispositivos irão operar. A perda de percurso de referência $\overline{PL}(d_0)$ é calculada usando o modelo de perda de percurso de espaço livre [5],

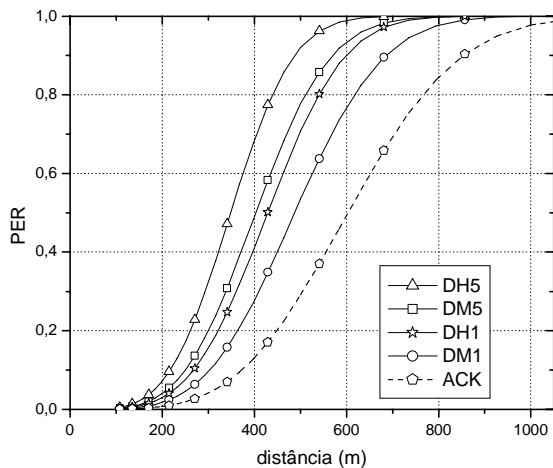
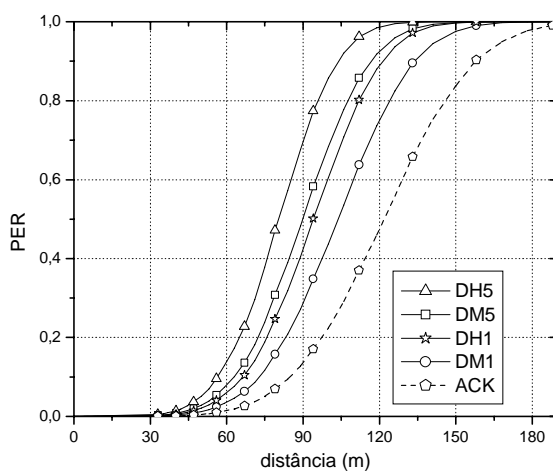
$$P_r(d) = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}, \quad (8)$$

sendo que P_t é a potência transmitida, d é a distância e λ é o comprimento de onda. O comprimento de onda é dado por $\lambda = c/f$, onde c é a velocidade da luz e f a frequência da portadora (2,4 GHz para Bluetooth). A potência recebida P_r é dada por $P_r = P_t - \overline{PL}$. Sendo R a taxa de transmissão (1 Mbps para Bluetooth) e N_0 a densidade espectral de potência unilateral do ruído, a relação sinal-ruído média recebida é $SNR = E_b / N_0 = P_r / (R \cdot N_0)$.

Tipicamente a potência de ruído térmico para uma largura de banda de 1 MHz é de -114 dBm. Considerando um receptor Bluetooth comercial [8] com figura de ruído de 23dB tem-se uma potência de ruído $N = N_0 B = -91$ dBm. Para aplicar o modelo logarítmico de perda de percurso foram considerados dispositivos Bluetooth classe 1, que de acordo com a especificação possuem um alcance de 100 metros. Os resultados são mostrados apenas para a classe 1, pois as classes 2 e 3 terão o mesmo comportamento, só que com um alcance menor. Aplicando o modelo logarítmico de perda de percurso a SNR média recebida foi calculada para diferentes separações transmissor-receptor. Este resultado é mostrado na Figura 9 para um expoente de perda de percurso $n=3$, $n=3.5$ e

$n=4$. Também é mostrado na Figura 9 o limiar de sensibilidade do receptor, que é uma potência mínima recebida de -70 dBm. A interseção desta linha com as curvas de SNR indicam o alcance máximo de transmissão. As Figuras 10 a 13 relacionam a distância transmissor-receptor e a taxa de erro de pacote dos pacotes assíncronos. Para o pacote de retorno (ACK) o eixo PER representa a probabilidade PER_r . Para os pacotes DM1, DM5, DH1 e DH5 o eixo PER representa a probabilidade PER_f .

Fig. 9. SNR \times distânciaFig. 10. PER \times distância, $m=0.5$, $n=3$ Fig. 11. PER \times distância, $m=0.5$, $n=4$

Fig. 12. PER x distância, $m=1.5$, $n=3$ Fig. 13. PER x distância, $m=1.5$, $n=4$

IV. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PARÂMETRO m DE NAKAGAMI

A principal motivação na análise do Bluetooth em canais com desvanecimento Nakagami é que o parâmetro de desvanecimento m pode ser usado como uma métrica para questões como formação de scatternets, estratégias de escalonamento, esquemas de roteamento e técnicas de economia de energia. Estes tópicos de pesquisa têm recebido grande atenção recentemente. Portanto a estimação do parâmetro m é uma questão prática importante. Muitos estimadores têm sido propostos na literatura, como descrito em [9]. Em [10], Zhang mostra que o método clássico proposto por Greenwood é superior aos outros estimadores e tem baixa complexidade computacional. Não apenas m pode ser estimado, mas também a relação sinal-ruído, como apresentado em [11].

Os valores de m e SNR podem ser usados na estimação da qualidade do canal para selecionar um tipo de pacote que maximize a vazão na rede, como proposto em [12]. A topologia da rede também pode ser escolhida baseada nas condições do canal. Por exemplo, um nó escravo que recebe um inquiry de mais de um nó mestre pode estimar o valor de m de todos estes enlaces e escolher o enlace com o mestre que tenha o maior valor de m . Para esquemas de escalonamento

de piconets, o mestre pode priorizar as transmissões quando as condições do canal forem boas, evitando transmissões em más condições. Um nó ponte entre duas ou mais piconets também pode ser escolhido baseado no parâmetro m . Em [13], um protocolo de roteamento e técnicas de economia de energia são apresentadas. O roteamento consiste em selecionar um caminho que tenha o máximo de energia acumulada. O parâmetro m pode ser adicionado como uma métrica pra escolher o melhor caminho, aumentando a economia de energia e o tempo de vida da scatternet.

V. EXTENSÃO PARA O SIMULADOR BLUEWARE

Blueware [7] é um simulador de scatternets Bluetooth de código aberto implementado como uma extensão do NS-2 [6]. Os resultados da Seção 3 para desvanecimento Nakagami foram incorporados no simulador, que originalmente não possui nenhuma modelagem para o canal de rádio. Assim, condições de transmissão mais realistas podem ser simuladas. Também foram inseridos modelos de dispositivos classe 1, para permitir a formação de piconets e scatternets com diferentes classes de potência.

Como exemplo das novas características do simulador, são apresentados dois cenários de simulação usando o *Blueware*. O primeiro cenário consiste de quatro nós Bluetooth da classe 3 para verificar os efeitos do desvanecimento Nakagami. Esta configuração é mostrada na Figura 14, com as distâncias entre os nós e a qualidade do canal (m_1 ou m_2). O segundo cenário tem dispositivos de diferentes classes (Figura 16). Em geral, dispositivos mais próximos têm condições de canal melhores ($m=m_1$) que os dispositivos separados por distâncias maiores, que sofrerão um desvanecimento mais severo ($m=m_2$).

As scatternets são formadas usando o algoritmo TSF (*Tree Scatternet Formation*) [14], já implementado no simulador. A topologia da scatternet formada para o primeiro e segundo cenário são mostradas nas Figuras 15 e 17, respectivamente. Na simulação foi usado tráfego CBR de 720 kbps e um expoente de perda de percurso $n=3$. Há sempre um único fluxo de dados CBR na rede, usando pacotes DH5. Os resultados da simulação para diferentes valores de m_1 e m_2 são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Como esperado, os enlaces com desvanecimento menos severo têm um desempenho melhor. Também é interessante notar que sempre que o tráfego passa por um nó ponte a vazão diminui significativamente, pois o nó ponte tem que dividir seu tempo entre duas piconets. Os resultados dependem também do esquema de escalonamento da piconet e da scatternet. O algoritmo usado foi o LCS (*Locally Coordinated Scheduling*) [15], em que o nó ponte permanece mais tempo na piconet com maior tráfego e menos tempo na piconet com menor tráfego.

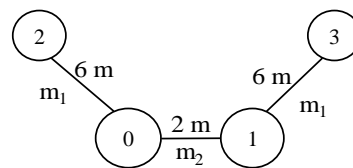


Fig. 14. Primeiro cenário de simulação com quatro dispositivos

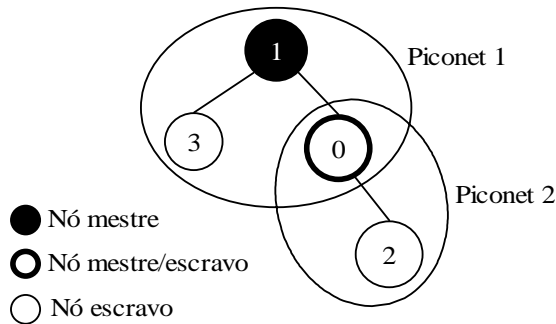


Fig. 15. Topologia da scatternet para o primeiro exemplo

TABELA 3. VAZÃO – PRIMEIRO CENÁRIO

Nós Fonte – Destino	Vazão (kbps)		
	$m_1 = 1$ $m_2 = 0.5$	$m_1 = 1$ $m_2 = 0.75$	$m_1 = 1$ $m_2 = 1$
1-0	333	505	656
3-1	658	658	658
3-0	195	263	335
3-2	192	250	318

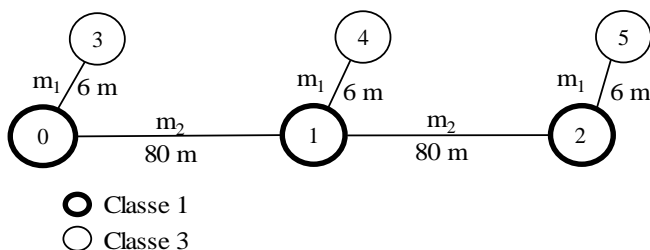


Fig. 16. Segundo cenário de simulação com dispositivos de diferentes classes

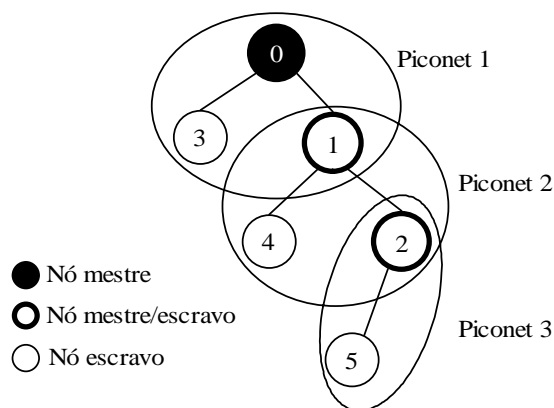


Fig. 17. Topologia da scatternet para o segundo exemplo

TABELA 4. VAZÃO – SEGUNDO CENÁRIO

Nós Fonte – Destino	Vazão (kbps)	
	$m_1 = 1$ $m_2 = 0.5$	$m_1 = 1.5$ $m_2 = 0.75$
3-0	648	668
3-1	197	262
3-4	188	243
3-2	40.9	214
3-5	32.1	209

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho abordamos a modelagem de desempenho de conexões Bluetooth em canais com desvanecimento Nakagami- m . Esta distribuição permite uma melhor caracterização de canais reais para comunicações móveis e sem fio. A vazão de enlaces Bluetooth usando os pacotes assíncronos foi calculada para diferentes condições de desvanecimento. Relações entre taxa de erro de pacote e distância entre os nós foram derivadas e incorporadas no simulador de código aberto Blueware, o que permite a simulação de piconets e scatternets sob diferentes condições de canal. Como exemplo, alguns cenários de scatternets foram apresentados e simulados usando a versão modificada do Blueware para canais com desvanecimento Nakagami. Outros cenários com diferentes topologias, número de nós e piconets podem ser considerados. Como trabalhos futuros, pretendemos comparar os modelos analíticos com dados de vazão obtidos através de medição prática e investigar a utilização do parâmetro m estimado de cada enlace como métrica para escalonamento de piconets e roteamento em scatternets.

REFERÊNCIAS

- [1] Bluetooth SIG, "Specifications of the Bluetooth system", *Core Version 1.1*, February 2001. <http://www.bluetooth.com>
- [2] M. Valenti and M. Robert, "Improving the QoS of Bluetooth through turbo coding", Proc. IEEE Military Communications Conference, Los Angeles, CA, pp. 1057-1061, Outubro 2002.
- [3] M. C. Valenti, M. Robert e J.H. Reed, "On the throughput of Bluetooth data transmissions", IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Orlando, FL, pp. 119-123, Março 2002.
- [4] J. Proakis, *Digital Communications*, New York, NY: McGraw-Hill, 4th edition, 2001.
- [5] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice-Hall PTR, 1999.
- [6] ns-2 Network Simulator. <http://www.isi.edu/vint/nsnam>.
- [7] Blueware: Bluetooth simulator for ns. <http://nms.lcs.mit.edu/project/blueware>.
- [8] B. Koupal, M. Wang e C. Edelman, Case history: development of a Bluetooth transceiver in RF CMOS, Signia and Agilent Technologies, Abril 2002.
- [9] J. Cheng e N.C. Beaulieu, "Generalized moment estimators for the Nakagami fading parameter", *IEEE Communication Letters*, vol. 6, no. 4, pp 144-146, Abril 2002.
- [10] Q.T. Zang, "A note on the estimation of Nakagami- m fading parameter", *IEEE Communication Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 237-328, Junho 2002.
- [11] A. Ramesh, A. Chockalingam e L.B. Milstein, "SNR estimation in generalized fading channels and its application to turbo decoding", IEEE International Conference on Communications (ICC), Helsinki, Finland, Junho 2001.
- [12] M.C. Ju, C.H. Park, D.K. Hong, K.J. Youn e J.W. Cho, "Link management scheme of Bluetooth based on channel quality estimation", *IEE Electronics Letters*, vol. 38, no. 15, pp. 789-790, Julho 2002.
- [13] B.J. Prabhu e A. Chockalingam, "A routing protocol and energy efficient techniques in Bluetooth scatternets", IEEE International Conference on Communications (ICC), New York, Abril-Maio 2002.
- [14] G. Tan, A. Miu, H. Balakrishnan e J. Gutttag, "An efficient scatternet formation algorithm for dynamic environments", IASTED Intern. Conference on Communication Networks (CCN02), Cambridge, MA, Novembro 2002.
- [15] G. Tan e J. Gutttag, "A locally coordinated scatternet scheduling algorithm", IEEE Conference on Local Computer Networks, Tampa, FL, Novembro 2002.