

# Avaliação de Desempenho de Redes Bluetooth usando o Modelo de Captura

Carlos de M. Cordeiro e Djamel F. H. Sadok  
Centro de Informática - UFPE  
 [{cmc,jamel}@cin.ufpe.br](mailto:{cmc,jamel}@cin.ufpe.br)

## Resumo

*Bluetooth é uma interface de radio universal que opera na frequência de 2.45 GHz e que permite dispositivos eletrônicos se comunicarem através de redes ad-hoc sem fio. Neste tipo de rede, cada dispositivo pode se comunicar simultaneamente com até sete outros dispositivos por piconet. Além do mais, cada dispositivo pode pertencer a diversas piconets. Para se determinar que tipos de aplicações podem rodar sobre este tipo de redes, é necessário analisar o desempenho de seu protocolo de acesso ao meio e, conseqüentemente, que qualidade de serviço pode ser oferecido às aplicações. Desta forma, este trabalho tem como objetivo fazer uma análise do seu protocolo de acesso ao meio, chamado de L2CAP, e aferir seu desempenho através de um modelo analítico e posterior simulação. Este modelo mostra claramente o efeito da interferência na vazão das piconets e quantifica seu valor neste tipo de configuração.*

## Abstract

*Bluetooth is a universal radio interface operating at the 2.45 Ghz ISM (Industrial–Scientific–Medical) band which supports short range ad-hoc wireless networks or piconets with up to eight devices. In these networks, piconets may overlap and a given device may join more than a single piconet. This work looks at the bandwidth performance of Bluetooth medium access protocol, L2CAP, and shows its impact on application layer throughput. The results of both an analytical model and simulations based on signal capture are shown. Next, these results are analyzed and proved to validate each other. Furthermore, the effect of piconets interference on throughput are also presented and discussed.*

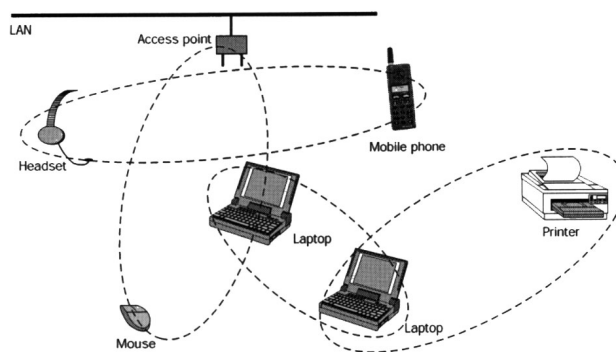
**Palavras Chave:** Comunicação sem fio, Avaliação de Desempenho, Redes Ad-hoc.

## 1. Introdução

Bluetooth [1, 6, 7, 11] é o conceito de uma rede ad-hoc sem fio que foi apresentado em Fevereiro de 1998. Com bluetooth, terminais móveis dentro do alcance um do outro (até 10m [11]) podem estabelecer conexões *ad hoc*. Bluetooth é projetado para suportar tanto tráfego síncrono, e.g. voz, como assíncrono, e.g. tráfego de dados IP. O SIG (*Special Interest Group*) bluetooth [1], liderado pela indústria, está conduzindo o desenvolvimento da tecnologia e trazendo-a para o mercado.

A tecnologia bluetooth, que opera na frequência de 2.45 GHz, elimina a necessidade de fios, cabos e conectores para e entre telefones sem fio ou móveis, modems, PDAs, computadores, impressoras, projetores, redes locais, entre outros, e abre o caminho para novos dispositivos e aplicações completamente diferente das existentes atualmente. Dois ou mais dispositivos bluetooth que compartilham um canal formam uma piconet. Para regular o tráfego no canal, um dos dispositivos se torna o mestre da piconet. Por outro lado, um dispositivo pode participar de mais de uma piconet, e um conjunto de piconets é chamado de scatternet. A figura 1 ilustra estes conceitos num cenário típico de comunicação neste tipo de redes. Neste tipo de configuração, as comunicações que ocorrem dentro de cada piconets são afetadas pelas interferências provenientes das piconets vizinhas, sendo necessário quantificar seu efeito e, desta forma, otimizar o desempenho da rede.

Até o momento não foi efetuado nenhum trabalho que se preocupa em aferir o desempenho do protocolo de enlace de dados das redes bluetooth, tanto sob uma perspectiva analítica quanto de simulação, o que é fundamental para determinar os tipos de aplicações que poderão ser utilizadas e os seus desempenhos neste tipo de redes. Neste trabalho, desenvolveremos um modelo analítico que determina a *vazão normalizada*, ou seja, o número de pacotes recebidos corretamente por slot, do protocolo de acesso ao meio de redes bluetooth



**Figura 1 – Modelo de conectividade local sem fio**

Grande parte dos artigos que avaliam o desempenho de redes sem fio que usam técnicas de acesso randômico, e.g. Slotted ALOHA [5], empregam o fenômeno chamado de captura [8, 9, 10] para tal. O fenômeno de captura é a habilidade que um receptor tem de detectar um sinal mesmo na presença de outros sinais, chamados de interferência. Em sistemas reais, se tem captura caso a razão entre a potência do sinal a ser detectado e a potência da interferência (SIR) é maior que um dado limite, chamado de *razão de captura*, que depende da implementação do sistema. Vamos mostrar neste artigo que a capacidade de captura pode também ser explorada em redes bluetooth uma vez que os sinais chegam aos diversos dispositivos com diferentes níveis de potência devido à atenuação, a obstáculos no caminho do sinal e as interferências geradas entre as piconets.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. A seção 2 descreve a arquitetura da pilha de protocolos do bluetooth, dando ênfase ao protocolo de acesso ao meio, denominado de L2CAP. Em seguida, a seção 3 apresenta as suposições sob as quais será desenvolvido o modelo analítico do L2CAP exposto na seção 4. A seção 5 continua com uma análise numérica do modelo analítico desenvolvido. A seguir as seções 6 e 7

descrevem, respectivamente, o modelo de simulação usado na avaliação do L2CAP e os resultados da simulação. Por fim, este artigo é concluído na seção 8.

## 2. A Arquitetura Básica de Protocolos do Bluetooth

A arquitetura básica da pilha de protocolos do bluetooth é formada pelos seguintes protocolos mostrados na figura 2:

- *Baseband Protocol* – Se responsabiliza pelas questões de temporização, framing, pacotes, e controle de fluxo.
- *Link Manager Protocol* – Assume a responsabilidade de gerenciar o estado das conexões, gerenciamento de potência, e outras funções de controle.
- *Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)* – É o protocolo que atua na camada de enlace de dados. É responsável pelos serviços de dados orientado e não-orientado a conexão, segmentação e remontagem, bem como onde se localiza o protocolo de acesso ao meio.

O L2CAP (*Logical Link Control and Adaptation Layer Protocol*) é um protocolo baseado em *polling* onde o dispositivo mestre de uma rede bluetooth seleciona qual outro dispositivo terá o próximo acesso ao meio. Um dispositivo que seja selecionado pelo mestre tem permissão de transmitir, enquanto os demais ficam em estado de espera. Com isso, colisões são evitadas nestas redes ao contrário do que ocorre em algumas redes locais (e.g. Ethernet).

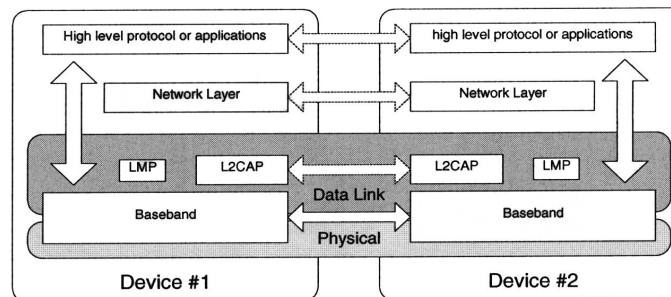


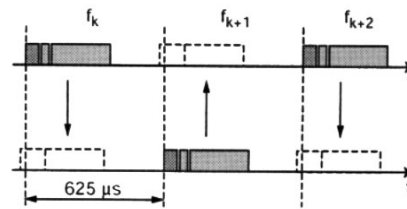
Figura 2 – Arquitetura de protocolos do bluetooth

L2CAP é baseado em pacotes, mas segue um modelo de comunicação baseado em canais. Um canal representa um fluxo de dados entre entidades L2CAP em dispositivos remotos. Estes canais podem ser orientado ou não-orientado a conexão.

### 2.1 Definição do Canal

Os canais bluetooth usam um esquema FH/TDD (*frequency-hop/time-division-duplex*) como indicado na figura 3. O canal é dividido em intervalos de  $625\mu\text{s}$  – chamados de slots – onde é usada uma frequência diferente para cada slot. Este esquema oferece uma taxa nominal por hop de 1600 hops/segundo. Um pacote pode ser transmitido por intervalo/slot. Slots subsequentes são usados alternadamente para transmissão e recepção o que resulta num esquema TDD. Desta forma, duas ou mais unidades compartilhando o mesmo canal formam uma piconet, onde um dispositivo atua como mestre, controlando o tráfego, e os outros dispositivos atuam como escravos.

Em redes bluetooth, um canal faz uso de diversos hops de 1 MHz. Com a modulação usada nesta rede, chamada de FSK (*Frequency Shift Keying*), obtém-se uma taxa simbólica de 1Mbps.



**Figura 3 – Canal bluetooth.**

## 2.2 Definição do Enlace Físico

A especificação Bluetooth define dois tipos de enlaces que suportam aplicações de voz e dados: o enlace SCO (*Synchronous connection-oriented*) e o ACL (*Asynchronous connectionless*). O primeiro suporta conexões típicas de voz, ou seja, conexões simétricas, por comutação de circuitos e ponto-a-ponto. Já o segundo tipo de enlace suporta conexões tanto simétricas quanto assimétricas, com comutação de pacotes que são geralmente usadas para transmissão de dados em rajadas.

Para os enlaces do tipo ACL, a especificação do Bluetooth define, ainda, um conjunto de pacotes, são eles: pacotes de dados de 1-slot, 3-slot e 5-slot. Os dados podem ser enviados com ou sem FEC (*Forward-Error Correction*). A tabela 1 mostra a vazão máxima obtida, segundo [6], em um enlace ACL através de medições realizadas em condições ideais, ou seja, sem a presença de interferência e/ou obstáculos. DMx representa pacotes de dados de x-slot, com FEC; DHx representa pacotes de dados sem FEC.

Tipo	Simétrico (Kbps)	Assimétrico (Kbps)	
		DMx	DHx
DM1	108.0	108.8	108.8
DH1	172.8	172.8	172.8
DM3	256.0	384.0	54.4
DH3	384.0	576.0	86.4
DM5	286.7	477.8	36.3
DH5	432.6	721.0	57.6

**Tabela 1 – Vazão (em Kbps) em um enlace ACL**

Neste trabalho daremos enfoque aos enlaces do tipo ACL uma vez que a especificação do L2CAP é definida apenas para enlaces do tipo ACL [11]. Além disso, a maioria das aplicações de transferência de dados utilizará esta camada.

## 3. Suposições do Modelo

Inicialmente, a análise do L2CAP foi conduzida usando-se métodos analíticos onde certas suposições foram feitas. Como pode ser visto a partir da especificação [1], o aparecimento de interferência se apresenta entre um conjunto de piconets independentes, uma vez que a configuração dos relógios dos dispositivos mestres não estão sincronizados e, portanto, pacotes de piconets vizinhas se sobrepõem.

Os dispositivos, sejam pertencentes a uma piconet ou a diferentes piconets formando uma *scatternet*, estão distribuídos geograficamente em um plano de acordo com um processo de Poisson de intensidade  $\lambda$  estações/ $m^2$ . Vamos ainda considerar que um dispositivo atuando como transmissor num dado instante se encontra no centro de um cluster hexagonal imaginário e opere com uma antena omni-direcional. Apenas como conveniência analítica, a área hexagonal do cluster será normalizada para  $\pi$ , e os clusters serão aproximados por círculos de raio unitário.

Como especificado no L2CAP, os dispositivos transmitem pacotes em slots de tempo e, dentro de uma piconet, as transmissões são escalonadas tal que apenas um dispositivo por vez possa transmitir e, portanto, evita-se contenção. As transmissões de pacotes em diferentes piconets também são sincronizadas em termos e slots de tempo, de tal forma que múltiplas transmissões se sobrepõem completamente. Similarmente, cada dispositivo mestre transmite comandos de *polling* apenas para os outros dispositivos pertencentes à sua piconet.

A potência  $P_R$ , recebida de um receptor localizado a uma distância  $r$ , é computada assumindo um modelo de propagação que leva em consideração a atenuação, um sombreamento (*shadowing*) log-normal, devido às irregularidades do local, e uma perda  $\eta$  segundo a lei de perda de potência. O expoente de perda de propagação,  $\eta$ , tipicamente assume um valor próximo a 4 [2]. A potência recebida  $P_R$  é, portanto, dada por [3]:

$$P_R = \alpha^2 e^\xi K r^{-\eta} P_T, \quad (1)$$

onde  $\alpha^2$  é uma variável randômica distribuída exponencialmente com média unitária,  $\xi$  é uma variável randômica Gaussiana com média zero e variância  $\sigma^2$ ,  $Kr^{-\eta}$  se refere à lei de perda de potência, e  $P_T$  é a potência transmitida, assumindo o mesmo para todos os dispositivos. Uma vez que  $\xi$  é a atenuação lognormal dada em decibéis, o parâmetro de sombreamento,  $\sigma$ , é normalmente dado em dB. Note que com esta notação,  $\sigma = 0$  significa que a atenuação lognormal em dB é Gaussiana com desvio padrão zero, i.e., é uma constante.

O modelo de captura assume que um receptor pode detectar corretamente um pacote cuja potência recebida é  $P_0$  se

$$\frac{P_0}{\sum_i P_i} > b$$

onde  $P_i$  representa a interferência, e.g. entre piconets, i.e., a potência recebida de um pacote transmitido por um dispositivo na piconet  $i$ , e  $b$  é a *razão de captura*.

#### 4. Análise da Vazão

A equação (1) pode ser usada para representar a potência na qual qualquer sinal é recebido, seja este um sinal útil ou proveniente de interferência. No que se segue, usaremos o índice “0” para representar sinais úteis e o índice “ $i$ ” para representar a interferência da piconet  $i$ ,  $i \neq 0$ . De acordo com o modelo definido na seção anterior, a probabilidade,  $P_S$ , que um pacote transmitido por um dispositivo “0” seja recebido com sucesso quando  $\kappa \geq 1$  pacotes ( $\kappa = n^\circ$  de piconets) de outras piconets estão se sobrepondo no receptor é dado por:

$$P_S = P \left[ \frac{\alpha_0^2 e^{\xi_0} K r_0^{-\eta} P_T}{\sum_{i=1}^{\kappa} \alpha_i^2 e^{\xi_i} K r_i^{-\eta} P_T} > b \right], \quad (2)$$

onde  $b$  é a razão de captura. Dependendo da distribuição de captura dos  $r_i$ 's em (2), diferentes situações podem ser levadas em consideração. A equação (2) assume que as piconets são independentes uma das outras, que é o foco deste estudo. No caso de se considerar scatternets, a equação (5.148) de [12] pode ser aplicada com pequenos ajustes na equação em si e neste modelo.

Pacotes que tiveram suas transmissões falhadas (com probabilidade  $1 - P_S$ ) se juntam aos mais novos na tentativa de transmissão e constituem o tráfego oferecido, ao qual caracterizamos como a intensidade do estado-estável,  $G$  pacotes por slot por cluster. Como a probabilidade  $P_S$  depende da localização do usuário, a densidade de pacotes a serem transmitidos, i.e., o tráfego oferecido relacionado a uma área elementar localizada em  $(r, \theta)$ , i.e.,  $g(r, \theta) r dr d\theta$  pacotes/slot, dependem de  $r$  e  $\theta$ . O tráfego total oferecido num cluster pode, portanto, ser expresso por:

$$G = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 r dr g(r, \theta). \quad (3)$$

Similarmente, a vazão é dada por:

$$S = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 r dr s(r, \theta), \quad (4)$$

onde  $s(r, \theta)$  é a densidade de vazão. Até agora, nos concentramos em um par de transmissor-receptor genérico: para continuar com a análise precisamos especificar a distribuição de interferência.

A probabilidade de sucesso  $P_S$  depende, por sua vez, da lei da densidade  $g(r, \theta)$  que o tráfego oferecido apresenta no plano. Mesmo com a suposição de Poisson para as localizações dos dispositivos,  $g(r, \theta)$  não é uniforme devido aos argumentos expostos acima, e isso introduz uma complexidade intratável. Ademais, no bluetooth as transmissões interferentes podem vir, entre outros, de outras piconets, o que complica ainda mais o modelo. Portanto, para proceder com a análise devemos fazer as seguintes suposições:

- I. Os dispositivos gerando transmissões interferentes estão distribuídos uniformemente fora da piconet de acordo com o modelo espacial de Poisson;
- II. As transmissões interferentes são geradas por cada dispositivo independentemente dos outros e de slot para slot de tal forma que eles, coletivamente, obedeçam a um modelo de Poisson de  $G$  pacotes por slot por cluster;
- III. As variáveis  $\alpha_i^2$  e  $\xi_i$  são extraídas independentemente em cada transmissão.

O raciocínio da suposição III vem do fato de que as condições de atenuação, em transmissão de banda estreita (*narrow-band*), podem ser assumidas independentes de slot para slot [4]. As suposições acima simplificam a análise uma vez que elas ignoram as

correlações temporais e espaciais que existem em sistemas reais. Como consequência, a distribuição da potência da interferência e o processo de captura dependem somente de  $G$ .

A probabilidade  $P_S$  é obtida através de (2), onde  $\kappa$  é uma variável de Poisson randômica e  $r_i$ ,  $i = 1, \dots, \kappa$ , são linearmente distribuídas no plano (i.e., as localizações dos usuários são distribuídas uniformemente), de acordo com as suposições de Poisson I e II. Ao final do processo de médias, que também incluem as médias em  $\alpha_i^2$  e  $\xi_i$ , nós obtemos (detalhes podem ser encontrados no Apêndice A):

$$P_S(G, r_0) = \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \frac{e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-GJ(\xi, r_0)}, \quad (5)$$

onde

$$J(\xi, r_0) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_1^{\infty} \frac{2rdr}{1 + b^{-1}e^{\xi-x} \left(\frac{r}{r_0}\right)^\eta}. \quad (6)$$

Note que, devido à simetria circular, não há dependência em  $\theta$ . A vazão é então avaliada assumindo que há equilíbrio entre o novo tráfego gerado e o tráfego que é transmitido corretamente, i.e.,

$$s(r) = P_S(G, r)g(r). \quad (7)$$

A equação acima representa uma generalização da eq. (37) em [5], que não admite solução geral. Felizmente, uma solução simples existe para o caso prático em que se requer uma vazão uniforme. Neste caso,  $s(r) \equiv s$  e  $S = \pi s$ , onde  $\pi$  é a área do cluster. Logo, substituindo em (3)  $g(r)$  como obtido de (7), temos que:

$$G = \int_0^1 \frac{2\pi r dr s}{P_S(G, r)}, \quad (8)$$

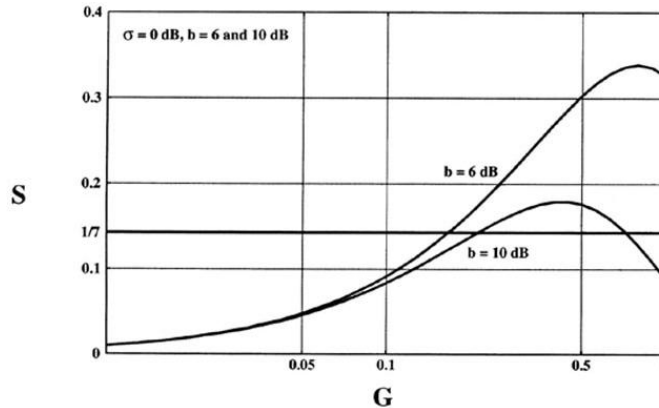
do qual  $s$  pode ser derivado fornecendo a vazão em função de  $G$ :

$$S(G) = \pi s = G \left( \int_0^1 \frac{2rdr}{P_S(G, r)} \right)^{-1}. \quad (9)$$

## 5. Análise Numérica do Modelo

A análise aproximada desenvolvida na seção anterior nos permite obter uma avaliação quantitativa do desempenho da camada de acesso ao meio do bluetooth. Para esta análise consideraremos uma *scatternet* composta por sete *piconets* ( $\kappa = 7$ ).

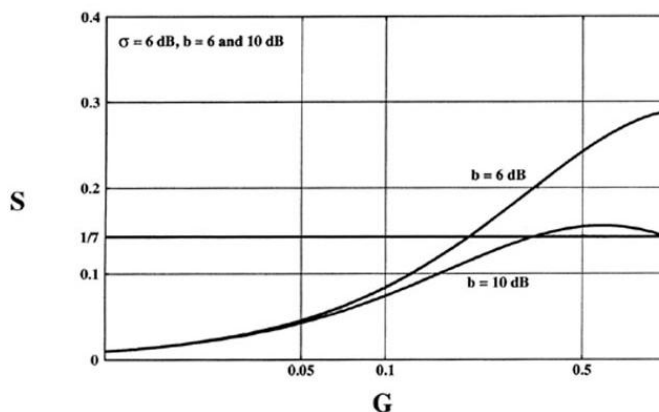
Nas figuras 4 e 5 a vazão normalizada,  $S$ , pelo tráfego oferecido,  $G$ , são mostrados, com  $\eta = 4$  e valores diferentes para a razão de captura,  $b$ , e para o parâmetro de sobreamento,  $\sigma$ .



**Figura 4 – Vazão média por piconet,  $S$ , vs. a carga oferecida por piconet,  $G$ ;  $\sigma = 0$  dB,  $b = 6$  dB e  $b = 10$  dB.**

A título de comparação, a vazão do sistema FDMA com os mesmos valores para os parâmetros de entrada é indicado nas figuras. Neste sistema, a vazão máxima não depende de  $G$  e é igual a  $S = 1/\kappa = 0.143$ . O tráfego oferecido é limitado a  $G = 1$ , que é o máximo valor possível no bluetooth uma vez que pode haver no máximo uma tentativa de transmissão de um pacote por slot por piconet.

Vemos que, em ambos os casos, a vazão máxima do L2CAP é maior do que a do FDMA e nos melhores casos ela alcança 0.34 pacotes/slot. Através destas figuras podemos ainda constatar o efeito da razão de captura e do parâmetro de sombreamento na vazão do protocolo de acesso ao meio. Vemos que a vazão é maior quando a razão de captura é menor. Era de se esperar este comportamento uma vez quanto mais baixa a potência de recepção necessária para se decodificar um sinal, mais pacotes podem ser recebidos corretamente. Por outro lado, observe o efeito do parâmetro  $\sigma$ . Este parâmetro reflete os obstáculos e áreas de interferência na rede. Comparando as figuras 4 e 5 vemos que quando temos um valor mais baixo deste parâmetro, maior tende a ser a vazão da rede. Cada sistema deve configurar este parâmetro de acordo com a razão de captura e vice-versa.



**Figura 5 – Vazão média por piconet,  $S$ , vs. a carga oferecida por piconet,  $G$ ;  $\sigma = 6$  dB,  $b = 6$  dB e  $b = 10$  dB.**

A partir dos cenários descritos pelas figuras 4 e 5 podemos chegar a quatro casos especiais em redes bluetooth:

- A figura 4 ilustra o caso em que temos uma rede com poucos obstáculos onde temos uma propagação satisfatória do sinal. Neste caso temos que a vazão



média normalizada é  $S = 0.34$  (para  $b = 6$  dB) e  $S = 0.18$  (para  $b = 10$  dB), o que determina uma vazão máxima aproximada de, respectivamente, 746.64 Kbps e 395.28 Kbps.

- Em contrapartida, a figura 5 descreve o caso em que se tem uma rede com uma maior quantidade de obstáculos. Temos, neste caso, uma vazão média normalizada de  $S = 0.28$  (para  $b = 6$  dB) e  $S = 0.16$  (para  $b = 10$  dB), determinando uma vazão máxima aproximada de, respectivamente, 614.88 Kbps e 351.36 Kbps.

Este resultado é de grande importância pois é possível, desta forma, determinar qual a qualidade de serviço máxima em termos de desempenho pode ser oferecido às aplicações em função da razão de captura configurada para o sistema. Além disso, pode-se mensurar este desempenho em ambientes com e sem obstáculos.

Um outro fator importante que influencia no recebimento com sucesso de um pacote é a distância,  $r$ , entre o transmissor e o receptor. Para melhor entender o relacionamento entre estes fatores e suas influências, a figura 6 mostra a probabilidade de um pacote ser recebido com sucesso  $P_s$ , pela distância  $r$  entre transmissor e o receptor no caso em que o tráfego de interferência proveniente de outras piconets fora ajustado independentemente:  $G = 0.58$  pacotes/slot/piconet, para o caso  $\sigma = 0$  dB e  $b = 6$  dB.

Finalmente, a figura 7 mostra o comportamento de  $P_s$  como função de  $r$  para o ponto de operação  $G = 0.43$ , correspondendo a  $S = 0.28$  como extraído da figura 4. Uma vez que nos referimos ao caso de densidade de vazão constante,  $s(r) = s$ , a curva correspondente  $g(r)$  é proporcional ao inverso daquela mostrada (veja (7)). Ao lado disso, note que o inverso de  $P_s(G, r)$  pode ser visto como o número médio de transmissões de um pacote por um dispositivo a uma distância  $r$ , na presença do tráfego  $G$ .

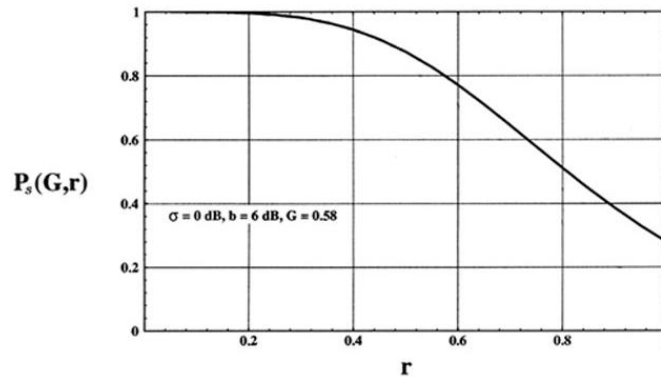


Figura 6 – Probabilidade de sucesso  $P_s(G, r)$ , vs. a distância  $r$ , para  $\sigma = 0$  dB,  $b = 6$  dB, e a intensidade do tráfego interferente  $G = 0.58$ .

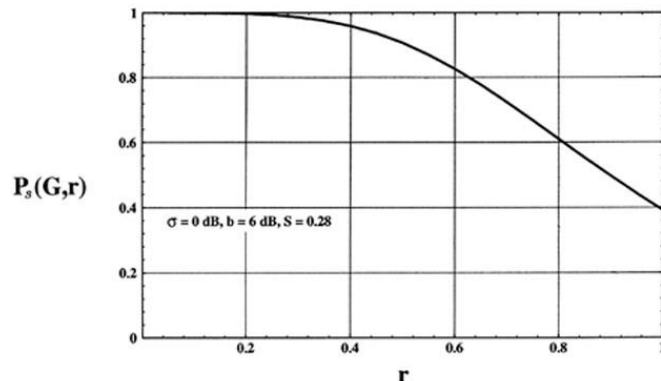


Figura 7 – Probabilidade de sucesso  $P_s(G, r)$ , vs. a distância  $r$ , numa vazão constante  $S = 0.28$ , para  $\sigma = 0$  dB,  $b = 6$  dB. Tráfego interferente  $G = 0.43$  pkts/slot/piconet.

Os resultados analíticos mostrados aqui foram todos verificados através de avaliações de Monte-Carlo dos valores  $P_s$  assumindo clusters hexagonais. Os valores obtidos validam perfeitamente o modelo analítico.

## 6. Modelo da Simulação

Nesta seção e na seguinte apresentaremos o modelo de simulação, bem como os resultados, obtidos na avaliação do L2CAP. Para isso, foram implementadas as funcionalidades básicas das camadas Baseband e L2CAP no simulador NS-2 (*Network Simulator - 2*). Entre estas funcionalidades destacamos a definição e gerenciamento de piconets, enlaces ACL simétricos, estabelecimento e liberação de conexões, o mecanismo de recuperação de erros da camada de enlace, entre outras.

### 6.1 Topologia da Rede

A topologia adotada reflete um uso comum de redes Bluetooth [6], a saber, um ambiente de escritório onde existem diversos dispositivos, podendo estar na mesma ou em diferentes piconets, com interface Bluetooth se comunicando simultaneamente. Neste ambiente típico, é comum ocorrer interferência entre piconets e entre outros dispositivos, e.g. telefones sem fio, que utilizam a mesma frequência de rádio. Neste estudo, daremos enfoque à interferência entre piconets dado que, devido ao número reduzido de estações por piconet (sete mais o mestre), poderá, provavelmente, existir uma série de piconets usando frequências de rádio simultaneamente.

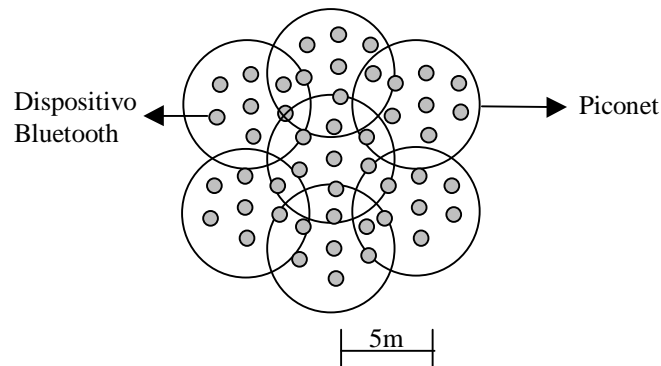


Figura 8 – Topologia usada na simulação.

A figura 8 ilustra a topologia de rede usada nesta simulação. Nesta topologia temos um total de sete piconets de tal forma que na simulação podemos configurar as mesmas para que a transmissão de diferentes dispositivos nestas diferentes piconets possam ou não interferir entre si. Esta facilidade nos permite quantificar a influência da interferência no desempenho da rede. Para ilustrar, consideramos as piconets como circunferências de raio 4m estando os dispositivos distribuídos com uma densidade de um dispositivo por  $4m^2$ . Adicionalmente, assumimos nesta avaliação que os dispositivos permanecem em apenas uma piconet durante toda a simulação, muito embora os mesmos possam se mover livremente por toda a área relativa a sua piconet.

### 6.2 Processo de Chegada

O processo de chegada determina como as camadas superiores à camada L2CAP produzirão dados para serem transmitidos. Para avaliarmos a vazão máxima obtida, adotamos um modelo em que as camadas superiores sempre têm dados para enviar.

Portanto, a taxa de chegadas de dados é sempre alta o suficiente para que as filas da camada L2CAP estejam sempre preenchidas. Para propiciar a troca de dados entre os dispositivos, os mesmos foram previamente escalonados de acordo com uma distribuição de Poisson para estabelecer entre si conexões ACL simétricas.

## 7. Resultados da Simulação e Discussão

### 7.1 Validação do Modelo Analítico

Inicialmente vamos avaliar os resultados da simulação contra àqueles apresentados no modelo analítico. A figura 9 mostra os resultados obtidos por simulação, para os mesmos parâmetros de entrada, comparados com os da análise numérica. Como se pode constatar, os resultados de simulação, embora numa escala menor, possuem o mesmo comportamento que aqueles do modelo analítico. A menor vazão se deve à de recuperação de erros do bluetooth que provê recuperação na camada de enlace. Estas mensagens não foram computadas para se determinar a vazão máxima. Apenas os dados efetivamente foram levados em consideração.

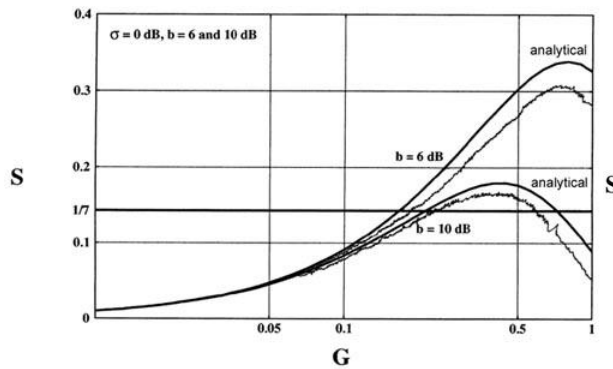


Figura 9 - Vazão média por piconet,  $S$ , vs. a carga oferecida por piconet,  $G$ ; Resultado analítico e de simulação para  $\sigma = 0$  dB.

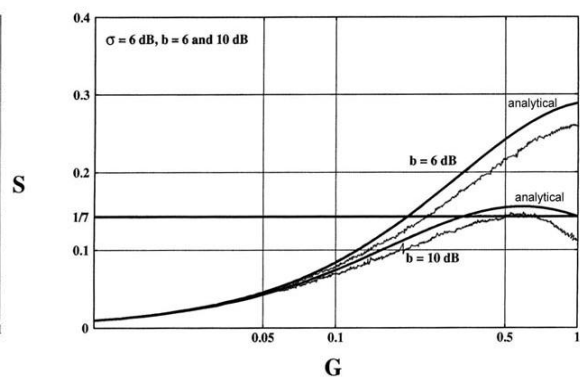


Figura 10 - Vazão média por piconet,  $S$ , vs. a carga oferecida por piconet,  $G$ ; Resultado analítico e de simulação para  $\sigma = 6$  dB.

A figura 10 apresenta os resultados analíticos e de simulação obtidos para  $\sigma = 6$  dB. Similarmente ao caso anterior, observamos que os resultados de simulação confirmam os obtidos analiticamente. De novo a vazão inferior se deve ao fato de termos pacotes de dados que não foram levados em consideração quando da computação da vazão.

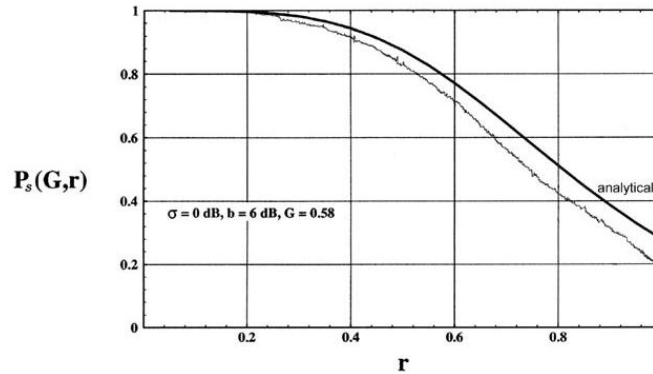
A tabela 2 resume as vazões máximas aproximadas obtidas, por piconet, para a configuração em estudo contrastando os resultados analíticos com os de simulação.

	Analítico	Simulação
$\sigma = 0$ e $b = 6$ dB	746.64	680.76
$\sigma = 0$ e $b = 10$ dB	395.28	373.32
$\sigma = 6$ e $b = 6$ dB	614.88	570.96
$\sigma = 6$ e $b = 10$ dB	351.36	329.40

Tabela 2 – Resultado das vazões máximas obtidas analiticamente e por simulação (em Kbps).

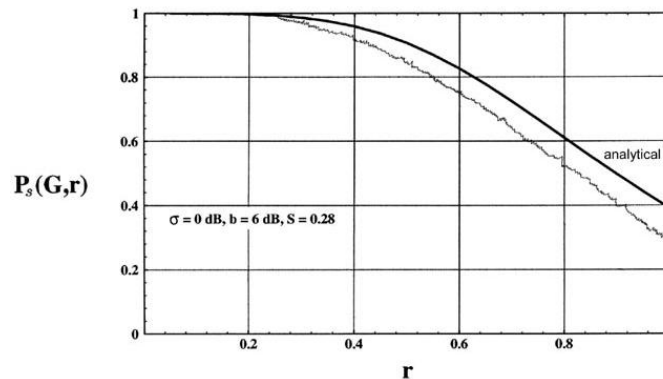
Vamos agora analisar probabilidade de um pacote ser recebido com sucesso em função da distância  $r$  entre o transmissor e o receptor como configurado no modelo analítico, a saber, no caso em que o tráfego de interferência proveniente de outras piconets fora

ajustado independentemente:  $G = 0.58$  pacotes/slot/piconet, para o caso  $\sigma = 0$  dB e  $b = 6$  dB. A figura 11 compara o resultado obtido analiticamente com aquele de simulação. Podemos facilmente constatar que o modelo analítico reflete adequadamente as probabilidades obtidas durante a simulação.



**Figura 11 – Probabilidade de sucesso  $P_s(G, r)$ , vs. a distância  $r$ ; Resultado analítico e de simulação para uma intensidade de tráfego interferente  $G = 0.58$ .**

Finalmente, a figura 12 mostra o comportamento de  $P_s$  como função de  $r$  para o ponto de operação  $G = 0.43$ , como indicado no modelo analítico. De forma análoga ao caso anterior, vemos que as duas curvas possuem a mesma tendência e, por conseguinte, temos a validação do modelo pelos resultados de simulação. As diferenças entre as curvas das figuras 11 e 12 se devem ao valor do tráfego interferente,  $G$ , que é maior na primeira.



**Figura 12 – Probabilidade de sucesso  $P_s(G, r)$ , vs. a distância  $r$ ; Resultado analítico e de simulação para uma vazão constante  $S = 0.28$  e tráfego interferente  $G = 0.43$  pkts/slot/piconet.**

## 7.2 Desempenho dos Enlaces ACL do Tipo DHx

Prevê-se que a grande parte das aplicações existentes de transferência de dados em pacotes, aquelas que rodam sobre o IP, serão mapeadas, nas redes bluetooth, em enlaces ACL do tipo DHx dadas sua natureza não confiável e não orientada a conexão. Devido a isso, vamos analisar a vazão deste tipo enlace durante as simulações com e sem a presença de interferência. A figura 13 mostra a vazão dos enlaces ACL DHx quando temos pacotes de dados usando 1-slot, 3slot e 5-slot, sem interferência. Assim como previa-se, enlaces ACL DH5 oferecem a maior vazão às aplicações uma vez que os mesmos fazem uma melhor utilização do canal. Contudo, a maior diferença de desempenho se dá entre os enlaces ACL DH1 e DH3. Isso mostra a grande ineficiência no uso de enlaces ACL DH1

uma vez que os mesmos fazem uma má utilização dos canais. Já entre os enlaces ACL DH3 e DH5 a diferença de desempenho não é tão grande, embora seja sensível para aplicações que requerem uma maior qualidade de serviço.

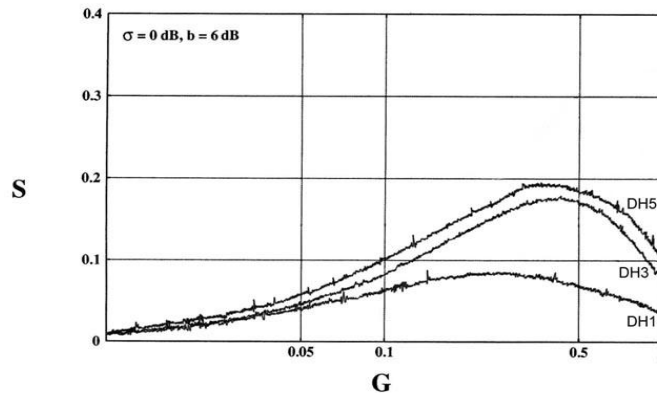


Figura 13 – Vazão dos canais ACL do tipo DHx sem interferência.

Por outro lado, a figura 14 apresenta o mesmo gráfico da figura 13 sendo que agora na presença de interferência. Observa-se que a interferência possui uma grande influência no desempenho deste tipo de enlace. Em todos os casos foi constatada uma queda sensível no desempenho.

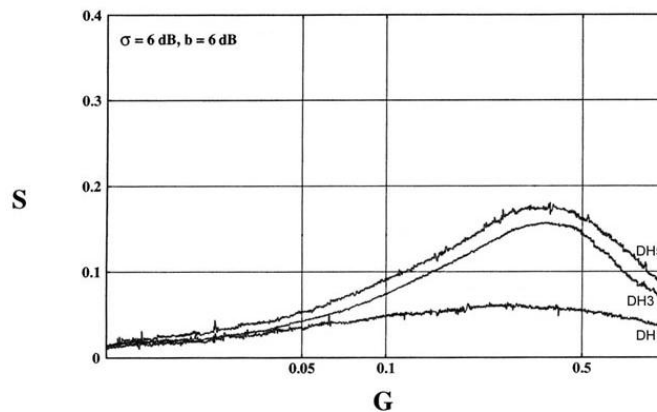


Figura 14 – Vazão dos canais ACL do tipo DHx com interferência.

A tabela 3 compara as vazões máximas obtidas nos enlaces ACL DHx, com e sem interferência, com aqueles apresentados na tabela 1. Uma breve análise revela que os valores das vazões para os enlaces ACL DHx apresentados na tabela 1 se assemelham bastante com aqueles sem interferência obtidos por simulação e apresentados na tabela 3. Por outro lado, podemos constatar a queda na vazão do enlace quando na presença de interferência. Isso mostra que é necessário levar este fator em consideração quando do projeto de novas aplicações ou ainda quando da utilização de aplicações já existentes neste tipo de redes.

	Condições Ideais	Sem Interferência	Com Interferência
DH1	172.80	186.66	120.78
DH3	384.00	373.32	329.40
DH5	432.60	417.24	373.32

Tabela 3 – Vazões dos enlaces ACL DHx com e sem interferência (em Kbps).

## 8. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este artigo apresentou a avaliação de desempenho do protocolo de acesso ao meio de redes bluetooth. Chegamos a conclusão que o protocolo L2CAP oferece boas garantias de desempenho quando comparados a métodos de acesso ao meio que utilizam técnicas como, por exemplo, divisão por frequência (FDMA). Em seguida, avaliamos o desempenho do L2CAP através de simulação. Os resultados obtidos validaram o modelo analítico, bem como mostraram a capacidade real destas redes mesmo quando temos um numero grande de piconets interferindo entre si. Vimos que a ausência de interferência nem sempre é alcançada, o que nos faz concluir que as aplicações devem considerar a queda de vazão fruto destas situações. Trabalhos futuros consistem em avaliar estas redes sob diversas aplicações.

### Apêndice A: Derivação da eq. (5)

Primeiro, a probabilidade condicional de sucesso do pacote  $P_{S1}(\kappa, \underline{\xi}, \underline{r})$ , onde  $\underline{\xi} = (\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_\kappa)$  e  $\underline{r} = (r_0, r_1, \dots, r_\kappa)$ , é computada, condicionada ao número  $\kappa$  de dispositivos interferentes, suas posições e os obstáculos do local. Portanto, temos (para  $W = 0$ ) que:

$$\begin{aligned}
 P_{S1}(\kappa, \underline{\xi}, \underline{r}) &= P\left[\frac{\alpha_0^2 e^{\xi_0} K r_0^{-\eta} P_T}{\sum_{i=1}^{\kappa} \alpha_i^2 e^{\xi_i} K r_i^{-\eta} P_T} > b \mid \kappa, \underline{\xi}, \underline{r}\right] \\
 &= P\left[\alpha_0^2 > b \sum_{i=1}^{\kappa} \alpha_i^2 e^{\xi_i - \xi_0} \left(\frac{r_i}{r_0}\right)^{-\eta} \mid \kappa, \underline{\xi}, \underline{r}\right] \\
 &= \int_0^{\infty} da_1 \dots \int_0^{\infty} da_{\kappa} \exp\left(-b \sum_{i=1}^{\kappa} e^{\xi_i - \xi_0} \left(\frac{r_i}{r_0}\right)^{-\eta} a_i\right) \prod_{i=1}^{\kappa} f(a_i) \\
 &= \prod_{i=1}^{\kappa} \frac{1}{1 + b e^{\xi_i - \xi_0} \left(\frac{r_i}{r_0}\right)^{-\eta}}, \tag{10}
 \end{aligned}$$

onde nós usamos o fato que os  $\alpha_i^2$ 's são variáveis randômicas independentes e exponencialmente distribuídas com média unitária e pdf  $f(a) = e^{-a}$ ,  $a > 0$ .

Seja  $D_a$  um anel circular de raio 1 e  $a > 1$ , centrado no receptor em questão. Para derivar (5), nós primeiramente calculamos a probabilidade condicional de sucesso do pacote  $P_S(r_0, a \mid \kappa \text{ em } D_a)$ , sob a condição que os  $\kappa$  interferentes ativos estão presentes em  $D_a$ . Deduzimos  $P_S(r_0, a \mid \kappa \text{ em } D_a)$  calculando a média de  $\xi_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, \kappa$ , e  $r_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, \kappa$ , em (10). Lembre-se que  $\xi_i$  é uma variável randômica Gaussiana com média zero. Devido à natureza do processo de Poisson, a localização dos interferentes é uniforme e identicamente distribuídas em  $D_a$ . Portanto,

$$\begin{aligned}
P_S(r_0, a | \kappa \text{ em } D_a) &= \int_{-\infty}^{\infty} d\xi_0 \frac{e^{-\frac{\xi_0^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} \prod_{i=1}^{\kappa} \int_1^a \frac{2r_i dr_i}{a^2 - 1} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi_i \frac{e^{-\frac{\xi_i^2}{2\sigma^2}} / (\sqrt{2\pi\sigma})}{1 + b e^{\xi_i - \xi_0} \left(\frac{r_i}{r_0}\right)^{-\eta}} \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} d\xi_0 \frac{e^{-\frac{\xi_0^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} (I_a(\xi_0))^\kappa, \quad (11)
\end{aligned}$$

onde

$$I_a(\xi_0) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_1^a \frac{2r dr}{a^2 - 1} \frac{1}{1 + b e^{x - \xi_0} \left(\frac{r_0}{r}\right)^\eta}, \quad (12)$$

e a  $\kappa$ -ésima potência em (11) é devido ao fato que os fatores do produto são realmente independentes do índice,  $i$ . Então, computando a média de (12) com respeito a distribuição de Poisson da quantidade de interferentes, obtemos:

$$\begin{aligned}
P_S(r_0, a) &= \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda\pi(a^2-1)} (\lambda\pi(a^2-1)^\kappa)}{\kappa!} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \frac{e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} (I_a(\xi))^\kappa \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \frac{e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\lambda\pi(a^2-1)[1-I_a(\xi)]}. \quad (13)
\end{aligned}$$

Finalmente, a probabilidade média de sucesso do pacote é dada por:

$$P_S(r_0) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} P_S(r_0, a) = \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \frac{e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\lambda\pi J(\xi, r_0)}, \quad (14)$$

onde

$$J(\xi, r_0) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} (a^2 - 1)[1 - I_a(\xi)], \quad (15)$$

que é igual a (6). Definindo  $G = \lambda\pi$ , (14) produz (5).

## Referências

- [1] Bluetooth SIG, “Bluetooth Specification”, [www.bluetooth.com](http://www.bluetooth.com).
- [2] W. C. Jakes, Jr., ed., *Microwave Mobile Communications*, New York: John Wiley & sons, 1974.
- [3] M. Zorzi and S. Pupolin, “Outage probability in multiple access packet radio networks in the presence of fading”, *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, vol. VT-43, pp. 604-610, August 1994.

- [4] C. K. Siew and D. J. Goodman, "Packet data transmission over mobile radio channels", *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, vol. VT-38, pp. 95-101, May 1989.
- [5] N. Abramson, "The throughput of packet broadcasting channels", *IEEE Trans. On Communications*, vol. COM-25, pp. 117-128, January 1977.
- [6] J. Haartsen, "Bluetooth – The universal radio interface for ad hoc, wireless connectivity", *Ericsson Review No. 3*, 1998.
- [7] R. Mettala, "Bluetooth Protocol Architecture", *White Paper*, August 1999.
- [8] L.G. Roberts, "ALOHA packet system with and without loss and capture", *Computer Communications Review*, vol 5., pp. 28-42, April 1975.
- [9] J.J. Metzner, "On improving utilization in ALOHA networks", *IEEE Trans. On Comm.*, vol COM-24, pp. 447-448, April 1976.
- [10] D. J. Goodman and A.A.M. Saleh, "The near/far effect in local ALOHA radio communications", *IEEE Trans. On Veh. Tech.*, vol. VT-36, pp.19-27, February 1987.
- [11] N. Muller, "Bluetooth Demystified", McGraw-Hill TELECOM, 1<sup>st</sup> Edition, 2000.
- [12] T. S. Rappaport, "Wireless Communications", Prentice Hall, ISBN: 013375536, January 1996.