

SISTEMA EFICIENTE DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA PARA
EQUIPAMENTOS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

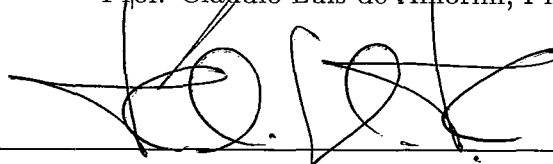
Alexandre Coser Monteiro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:



Prof. Claudio Luis de Amorim, Ph.D.



Prof. Felipe Maia Galvão França, Ph.D



Prof. Luiz Maltar Castello Branco, D.Sc.



Prof. Edison Ishikawa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
SETEMBRO DE 2006

MONTEIRO, ALEXANDRE COSER

Sistema Eficiente de Medição de Consumo
de Energia para Equipamentos de Comunica-
ção Sem Fio [Rio de Janeiro] 2006

XI, 50 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia de Sistemas e Computação, 2006)

Dissertação – Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1 - consumo de energia

2 - sem fio

3 - bluetooth

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

in memoriun de Euder Mendonça Monteiro

Agradecimentos

Aos meus pais que tanto se sacrificaram e lutaram para que eu pudesse ter oportunidades que eles nunca tiveram.

Aos professores Claudio e Maltar, pela orientação, confiança e experiência transmitida durante todo este tempo de convivência.

A toda equipe do Laboratório de Computação Paralela, em particular aos amigos Bragato, Fabio, João, Leonardo, Lauro, Patricia, Rafael, Renato, Ricardo e Kostin, pela paciência e disposição para ajudar nos momentos mais inoportunos.

Aos colegas de trabalho Alexandre, Angela, Clara e Motta por permitir que eu estivesse em dois lugares ao mesmo tempo.

Aos amigos de toda vida Loula, Rafael, Renata e Velloso, pelo apoio e compreensão dos momentos ausentes.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SISTEMA EFICIENTE DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA PARA EQUIPAMENTOS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

Alexandre Coser Monteiro

Setembro/2006

Orientador: Claudio Luiz de Amorim

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

O consumo de energia de equipamentos móveis sem fio tais como PDA's (*Personal Digital Assistant*) e *Laptops*, e também em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), depende fortemente da energia gasta pelos dispositivos de comunicação que eles utilizam. Dado que esses equipamentos e redes tipicamente funcionam através de bateria de pouca duração, torna-se portanto importante que os dispositivos de comunicação operem de maneira eficiente para poupar a bateria ao máximo. Nesta dissertação, desenvolvemos um protótipo de conversor de corrente/tensão em *hardware* para medir precisamente a energia gasta em cada um dos eventos básicos de busca, conexão e transporte que esses dispositivos utilizam nas operações de transmissão e recepção de informação. Para avaliar os benefícios de se dispor de um melhor perfil de consumo de energia para esses dispositivos testamos o conversor com o popular dispositivo *Bluetooth*. Através de medidas feitas pelo conversor calibrado e colocado em pontos de acesso para coleta de eventos do dispositivo bluetooth com seu protocolo operando em situações reais, obtivemos novas curvas de consumo de energia mais precisas do que as que o dispositivo oferece. Além de fornecer um melhor perfil de consumo de energia, os resultados também permitiram propor um novo sistema de consumo de energia para esses tipos de dispositivos de comunicação sem fio.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

AN EFFICIENT MEASUREMENT SYSTEM OF ENERGY CONSUMPTION
FOR WIRELESS COMMUNICATION EQUIPMENTS

Alexandre Coser Monteiro

September/2006

Advisor: Claudio Luis de Amorim

Department: Systems Engineering and Computer Science

The energy consumption of mobile wireless equipments such as PDA (Personal Digital Assistant), Laptops and Wireless sensor Network, are heavily dependent on the energy consumed by communications devices that they use. Given that those equipments and the networks operate on a short life batteries, it is important that the communication devices work efficiently to save energy. In this dissertation, we developed a hardware prototype of current/voltage converter, to measure precisely the energy spent in each basic event of searching, connecting and transporting those devices use in operations of data transmission and reception. To evaluate the benefits on have better profile of energy consumption for such devices we tested the converter with the popular Bluetooth device. Through measures made by the calibrated converter placed in access points for collecting bluetooth device events with its protocol operating in actual situations, we obtained new events curves of energy consumption even more precise than the ones that the device offers. Besides supplying a better profile of energy consumption, the results also allowed us to propose a new system of measure energy consumption for these wireless communication devices.

Sumário

1	Introdução	1
2	Contexto Tecnológico	4
2.1	Equipamentos de Comunicação Sem Fio	4
2.2	Problemas característicos da comunicação sem fio	6
2.3	O Protocolo Bluetooth	7
2.3.1	Banda de Rádio	8
2.3.2	Banda Básica	10
2.3.3	Protocolo de Controle Lógico do Enlace - L2CAP	11
2.3.4	Protocolo de Gerência de Enlace - LMP	11
2.3.5	Estabelecimento de Conexão	12
2.3.6	Controle de Energia	13
2.3.6.1	Indicador da Intensidade do Sinal Recebido - RSSI	13
2.3.6.2	Nível de Potência de Transmissão - TPL	14
2.3.6.3	Qualidade do Link - LQ	14
2.3.7	Regimes de Baixo de Consumo	14
2.3.7.1	Regime de funcionamento <i>Sniff</i>	15
2.3.7.2	Regime de funcionamento <i>Hold</i>	15
2.3.7.3	Regime de funcionamento <i>Park</i>	16
2.4	Propagação e Atenuação do Rádio	16
2.5	Trabalhos Relacionados	18
2.5.1	Alguns Modelos de Consumo de Energia	19
3	Sistema para Medição de Consumo de Energia em Equipamentos sem Fio	23
3.1	Unidade de Medida Direta de Consumo - UMDC	23
3.2	Modelo de Consumo de Energia	25

4	Metodologia Experimental	29
4.1	Experimentos e Medidas	29
4.2	Cenário I - Campo Aberto	30
4.3	Cenário II - Corredor	33
4.4	Cenários com Obstáculos - LCP	35
4.4.1	Cenário III - Regime Ativo	35
4.4.2	Cenário IV - Regime Sniff e Hold	38
4.5	Cenário V - Ping	39
4.6	Cenário VI - Mestre + 7 Escravos	42
4.7	Síntese dos Resultados	42
5	Conclusões	45
	Referências Bibliográficas	48

Lista de Figuras

2.1	Pilha de Protocolos <i>Bluetooth</i> e modelo Osi	8
2.2	Diagrama da Banda Básica e da Banda de Rádio [2]	9
2.3	Diagrama de tempo por divisão	10
2.4	Tipos de formações da rede Bluetooth: Piconet e Scatternet	11
2.5	Estabelecimento de conexão	12
2.6	Golden Receiver Power Range - GRPR	13
2.7	Modelo de Propagação por 2 caminhos	17
2.8	Modelo RF de 1ª Ordem	20
3.1	Unidade de Medida Direta de Consumo	24
3.2	Fluxograma do Sistema de Aquisição	25
3.3	Circuito Ressonante Paralelo	26
3.4	Curvas I(f)	27
4.1	Mestre e Escravo - TPL - Cenário I	31
4.2	Mestre e Escravo - I(f) - Cenário I	32
4.3	Tempo de RF - Cenário I	32
4.4	Corredor do Bloco I-2000	33
4.5	Mestre e Escravo - TPL - Cenário II	34
4.6	Mestre e Escravo - I(f) - Cenário II	34
4.7	Tempo de RF - Cenário II	35
4.8	Mapa do LCP	36
4.9	TPLs dos escravos Fonte e Destino	36
4.10	I(f) dos escravos Fonte e Destino	37
4.11	Tempo de RF cenário III	37
4.12	TPL Cenário III	39
4.13	I(f) Cenário III	39
4.14	Tempo de RF - Cenário IV	40

4.15	TPL - Cenário V	40
4.16	Mestre e Escravo - I(f) - Cenário V	41
4.17	Mestre e Escravo - Tempo Tx e Rx - Cenário V	41
4.18	Mestre - I(f) - Cenário VI	43
4.19	Mestre - Tempo - Cenário VI	43
4.20	Mestre - TPL - Cenário VI	44

Lista de Tabelas

2.1	Tabela Comparativa	6
2.2	Classes de Potência	9
2.3	Valores Medidos de γ	18
2.4	Valores de Consumo para BThode [17]	21

Capítulo 1

Introdução

O crescente mercado de dispositivos sem fio portáteis incluindo celulares, palmtops e laptops, entre outros, trouxe o desafio de como conectá-los sem lhes sacrificar a mobilidade. Isso envolve a solução de problemas básicos, tais como: que meio utilizar para conectar os dispositivos, qual protocolo que deve ser usado para transmissão de dados, como localizar outros dispositivos e como manter uma autonomia que não limite a mudança de localidade, enquanto se está conectado, e nem afete as funções básicas dos dispositivos móveis. Isso provocou uma série de estudos para a criação de métodos mais eficazes, especialmente visando o aumento da autonomia do equipamento através do uso eficiente da energia disponível de sua bateria.

Com o objetivo de gastar o mínimo de energia possível, em um ambiente de comunicação sem fio descentralizado, podemos encontrar diversos algoritmos que utilizam estimativa de consumo de energia para criar novas conexões com outros pontos da rede de comunicação e otimizar o roteamento e a transmissão de dados [24, 23]. Entre esses métodos, há alguns que utilizam simuladores de rede sem fio com pouca precisão e outros que não consideram ambientes fechados com alta possibilidade de reflexão do sinal eletromagnético [1, 18]. Os resultados das simulações mostram que o consumo por unidade de energia são medidas indiretas e não avaliam claramente os efeitos das diferenças entre dispositivos mestres e escravos, a variação com o aumento da distância entre os dispositivos, o ambiente onde ele está localizado e a distinção entre consumo de transmissão e de recepção.

A medida de consumo de energia é um dos parâmetros mais importantes para o auxílio na escolha dos equipamentos eletrônicos que formarão a rede de comunicação. Se o tipo de equipamento tiver alguma limitação relacionada à fonte de energia, como é o caso dos dispositivos de comunicação sem fio, então esse parâmetro se

torna essencial no momento da escolha pelo equipamento a ser utilizado. Apesar do manual técnico do equipamento conter tipicamente o valor médio de corrente consumida, esse isoladamente, não permite inferir, por exemplo, quanto tempo dura a sua bateria. A duração da bateria depende do ambiente e do tipo de aplicação onde o dispositivo de comunicação será empregado, conforme será mostrado no presente estudo.

A necessidade de se conhecer o comportamento de consumo de energia em diversos ambientes e a possibilidade de se diferenciar os consumos de transmissão e de recepção para obter informações mais realistas do que os cenários simulados em laboratório é a força motor dessa dissertação.

A correta caracterização da energia consumida nos permite prever com mais precisão se uma dada energia disponível no equipamento será suficiente para executar uma certa aplicação durante um tempo pré-determinado. Mais ainda ela permite que o consumo de energia seja gerenciado de modo a tentar economizá-lo e garantir a execução da aplicação. Por exemplo, em uma aplicação distribuída através de uma rede de computadores, a estimativa do consumo desta aplicação torna possível decidir se ela deverá ser realizada localmente ou enviada para outro ponto da rede.

Neste sentido, essa dissertação propõe um sistema para análise do consumo de energia de equipamentos sem fio que permite que as simulações ou experimentos em laboratório reflitam com maior precisão um cenário real de consumo.

A construção de um sistema eficiente para medição do consumo de energia em equipamentos sem fio permite representar os efeitos das diversas variáveis ambientais (localização, obstáculos, ruídos eletromagnéticos externos, etc ...) e diferentes métodos de controle de consumo, utilizados em inúmeros equipamentos de comunicação sem fio de diferentes fabricantes e protocolos distintos, em uma única função.

As principais contribuições dessa dissertação são:

1. Desenvolvimento de um protótipo de *hardware* simples e de baixo custo, capaz de medir o consumo preciso de energia de qualquer dispositivo de comunicação sem fio;
2. Construção de um sistema com alto índice de portabilidade capaz de atuar sobre qualquer protocolo de comunicação sem fio; e
3. Realização de análise comparativa das técnicas e métodos para avaliação do consumo de energia;

4. Caracterização das curvas de energia para diferentes ambientes e equipamentos de comunicação sem fio.

Esta dissertação apresenta, no Capítulo 2, as principais características dos equipamentos de comunicação sem fio e do protocolo Bluetooth, além de métodos utilizados para o cálculo do consumo de energia nesse tipo de protocolo. No Capítulo 3, é apresentado o sistema para medição do consumo de energia para equipamentos sem fio. O Capítulo 4, são descritos os experimentos realizados com o protocolo Bluetooth e seus resultados são discutidos. No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões desta dissertação.

Capítulo 2

Contexto Tecnológico

2.1 Equipamentos de Comunicação Sem Fio

Os equipamentos de comunicação sem fio podem ser usados simplesmente para enviar pequenas mensagens de um ponto a outro, em vez de se instalar um par de fios para transmitir um sinal elétrico simples a uma taxa de transferência muito baixa, até a montagem de complexas redes de comunicação envolvendo milhares de pessoas e grandes somas de informações a taxas de transferências da ordem de grandeza de giga bps. Arquiteturas de redes sem fio podem ser classificadas em estruturadas, são aquelas que fazem uso de um coordenador central de comunicação e não estruturadas (Ad-Hoc), que não utilizam este elemento centralizador que se liga a uma infra-estrutura já existente com fonte de energia. As redes estruturadas facilitam o desenvolvimento de técnicas eficientes para consumo de energia, através do seu elemento centralizador. Para o caso das redes não estruturadas, a falta destes elemento centralizador torna mais difícil o desenvolvimento de técnicas de economia de energia, entre outras.

Dentre as tecnologias de comunicação sem fio, as tecnologias Bluetooth, Wi-Fi e Zig-Bee estão entre as mais discutidas quando o assunto é automação de sistemas [19]. Por exemplo, quando se quer realizar a interligação de diversos tipos sensores que coordenam uma linha de produção industrial.

O padrão IEEE 802.15.1, também conhecido como Bluetooth, foi desenvolvido para ser usado dentro de uma PAN (*Personal Area Network*), utiliza conexão do tipo estrela, onde um mestre se comunica com vários escravos e qualquer escravo pode assumir o papel do mestre e trocar seu estado de escravo ou mestre, enquanto estiver conectado. Dentre suas principais características estão a baixa velocidade na transmissão de dados (1Mbps), o curto alcance, baixo consumo de energia e a

conexão sob demanda [15]. Em particular, o Bluetooth é muito utilizado para eliminar o uso de cabos entre dispositivos conectados a curta distância.

No padrão IEEE 802.11b ou Wi-Fi, a conexão é baseada na modulação *Direct Signal Spread Spectrum* (DSSS) de modulação, com uma taxa de transferência de 11 Mbps. Esta alta taxa de transferência é a principal característica do Wi-Fi [15, 10]. Na arquitetura tradicional do Wi-Fi temos um ponto de acesso fixo (AP) que faz parte de uma conexão com fio a uma rede local (LAN) incluindo uma conexão com a Internet. O usuário pode ser fixo (*Desktop*) ou semi-fixo (*Laptop*) para operar a estação Wi-Fi (STA) e devem possuir um cartão de rede com interface 802.11b. As STA só se comunicam com o AP através de uma topologia estrela (configuração básica de serviço). Este padrão é muito utilizado como ponto de acesso a serviços de rede e também permite uma configuração ponto a ponto onde um STA se comunica com outro sem a presença de um AP, porém só até três conexões ponto a ponto podem interagir na mesma área. Para transmissão de voz, o Wi-Fi não é o mais adequado devido à sua política segura de retransmissão, que gera incômodos atrasos na transmissão de voz. O longo alcance e o consumo moderado de energia também são características favoráveis e importantes do IEEE 802.11b.

ZigBee é parte do padrão da família de comunicação digital, IEEE 802.15. Este padrão foi publicado em Outubro de 2003, descritos para projetos de baixo custo, aplicações de baixo consumo de energia e transmissão de pequenos pacotes de informação. Ele não foi projetado para usar redes locais sem fio (WLAN), nem otimizado para serviços de TCP/IP nem qualquer aplicação que exija qualidade de serviço (QoS), porém suporta conexões multi-saltos como o Bluetooth. A *ZigBee Alliance* é um consórcio comercial que responde pela propaganda e especificações dos protocolos mais altos ainda não definidos. O principal objetivo da ZigBee são aplicações que possam reduzir tanto seu ciclo de trabalho como o tempo para troca de mensagens, em troca do baixo consumo de energia, como o teclado, o mouse, o joysticks sem fio e sensores usados em agricultura de precisão e monitoração ambiental. O ZigBee define duas camadas físicas, onde a primeira camada trabalha na faixa de 2,4 GHz e suporta uma taxa de transferência de 250 Kbps, dispõe de 16 canais centrados em $2405 + 5 \cdot k$ MHz ($0 \leq K \leq 15$). A segunda camada trabalha na faixa entre 868,0 - 868,6 MHz ou 902 - 928 MHz e com uma taxa de transferência de 20 Kbps e 40 Kbps [4].

A tabela 2.1 resume algumas características dos protocolos discutidos acima.

Características IEEE	802.11	Bluetooth	ZigBee
Duração da Bateria	Horas	Dias	Anos
Complexidade	Muito Complexo	Complexo	Simples
Nós/Mestre	32	7	64000
Alcance	100m	10m-100m	70m-300m
Velocidade	11Mbps-54 Mbps ou mais	1 Mbps	250Kbps

Tabela 2.1: Tabela Comparativa

2.2 Problemas característicos da comunicação sem fio

Em redes de comunicação sem fio, circuitos e algoritmos (ex. de roteamento) que buscam vencer o desafio de consumir pouca energia, por muitas vezes são obrigados a diminuir a qualidade de serviço para poupar energia. Algumas características inerentes à comunicação sem fio são apresentadas em [8, 21] e revisadas nesta secção. O tipo de aplicação em que a comunicação sem fio será empregado pode ressaltar um ou mais problemas e desafios, a saber:

- Conservação de energia - Muitos equipamentos sem fio são equipados com bateria, por este motivo são necessárias políticas eficientes de gasto de energia pois uma bateria é uma fonte de energia extremamente limitada.
- Topologia dinâmica da rede - Quando dispositivos sem fio formam uma rede, os nós desta rede podem ser móveis ou desconectar-se da rede por falhas ou interferências. Esta alta mobilidade dos nós gera mudanças na topologia do gráfico da rede e nas conexões entre os nós. Sob estas condições existe uma grande dificuldade para se otimizar o protocolo de conexão e roteamento entre dispositivos sem fio.
- Baixa qualidade na comunicação - A comunicação sem fio é menos estável e facilmente suscetível a fatores ambientais (condições meteorológicas, obstáculos, interferências de ondas de rádio de outras redes, etc..) que variam no tempo. Tais fatores geram a necessidade de uma recuperação rápida ou adaptação às mudanças, por parte das conexões da rede de modo a continuar mantendo a comunicação com todos os nós.
- Recursos limitados para processamento - Algumas aplicações para dispositi-

vos de comunicação sem fio, requerem uma grande disponibilidade de alguns recursos como, fonte de energia, largura de banda, memória e velocidade de processamento, porém as limitações físicas destes equipamentos de comunicação sem fio impedem a implementação destes recursos em seus componentes.

- Escalabilidade - Uma rede sem fio pode ser composta de centenas ou milhares de nós, logo seu protocolo de comunicação deve ser capaz de operar eficientemente tanto em meio a um número pequeno como grande de conexões.
- Interoperabilidade - Em um cenário mais dinâmico, um nó pode navegar por vários tipos de rede: Ad Hoc, celular, satélite, wireless, PSTN(*Public Switched Telephone Network*), Internet, etc... O ideal é realizar este chaveamento de modo transparente para o usuário.
- Estímulo a cooperação entre nós - Em certos cenários, a participação voluntária de alguns nós não é garantida, pois este nó pode pertencer a outro tipo de aplicação particular, no entanto sua participação em outra rede deveria ser estimulada, pois pode auxiliar na solução de problemas identificados de comunicação.

2.3 O Protocolo Bluetooth

Em 1994, a Ericsson iniciou pesquisa com a idéia de substituir os cabos que conectavam o computador e telefones móveis a seus acessórios. Este novo conceito de conexão sem fio foi batizado de Bluetooth, em homenagem ao rei Harald Blatand, conhecido como Harald Bluetooth, um monarca viking do século X que organizou a unificação de pequenos reinos existentes na Dinamarca e Noruega.

O Bluetooth SIG (*Special Interest Group*) foi montado em 1998, devido a percepção de grandes empresas de computação e telecomunicação, no grande potencial de mercado demonstrado pela inovação proposta. Em 1999 surgiu a primeira especificação técnica para o Bluetooth [3, 15]. A figura 2.1 ilustra seu protocolo em comparação ao modelo OSI(Open System Interconnections).

O núcleo do sistema Bluetooth é responsável pelas quatro últimas camadas (Gerenciamento de Link, Controle de Link, Banda Básica e Rádio). Os protocolos associados a estas camadas [3], podem ser atribuídos a uma única camada de protocolo, o Protocolo de Descobrimento de Serviço (SDP), enquanto todas os outros

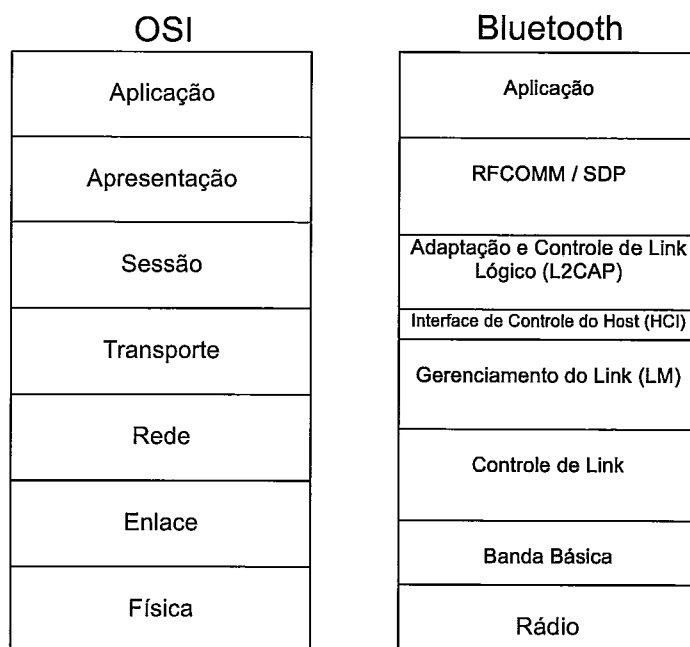


Figura 2.1: Pilha de Protocolos *Bluetooth* e modelo Osi

protocolos estão associados aos serviços de acesso genérico. Uma aplicação bluetooth exige um número adicional de serviços e protocolos mais elevados que são definidos pela Especificação Bluetooth.

As aplicações bluetooth podem ser divididas em perfis de operação onde cada perfil implementa um conjunto de protocolos. A divisão entre perfis permite que um determinado dispositivo implemente somente os protocolos necessários para a sua aplicação possibilitando um dimensionamento específico do processamento, tamanho, layout e fonte de energia. Entre os perfis básicos estão, o SDP, aplicações que utilizam portas seriais, fazem trocas de arquivos, utilizam serviços de telefonia sem fio e conexões simétricas do tipo *walkie-talkie* [15].

Esta dissertação irá apresentar somente as camadas do protocolo que tenham alguma relevância no controle do consumo de energia desses dispositivos.

2.3.1 Banda de Rádio

Esta camada permite que a comunicação ocorra sem a utilização de fio. O sistema Bluetooth opera na frequência ISM (*Industrial Scientific Medicine*) de 2.4GHz, com

uma taxa de transferência de 1 Mbps. A largura desta banda é de 2400 - 2483.5 Mhz, permitindo criar os 79 canais de comunicação utilizados pelo sistema.

No diagrama 2.2 podemos observar que o bloco RF (Banda de Rádio) é responsável por transmitir e receber informações do canal físico. O caminho entre a Banda Básica e o bloco RF, permite que a Banda Básica controle a frequência da portadora do bloco RF, que é responsável por transformar os dados produzidos pela Banda Básica em sinais para o canal físico de comunicação e vice versa.

A potência do sinal de saída está relacionada com a impedância da antena do dispositivo e obedece as três classes do sistema, de acordo com a tabela 2.2.

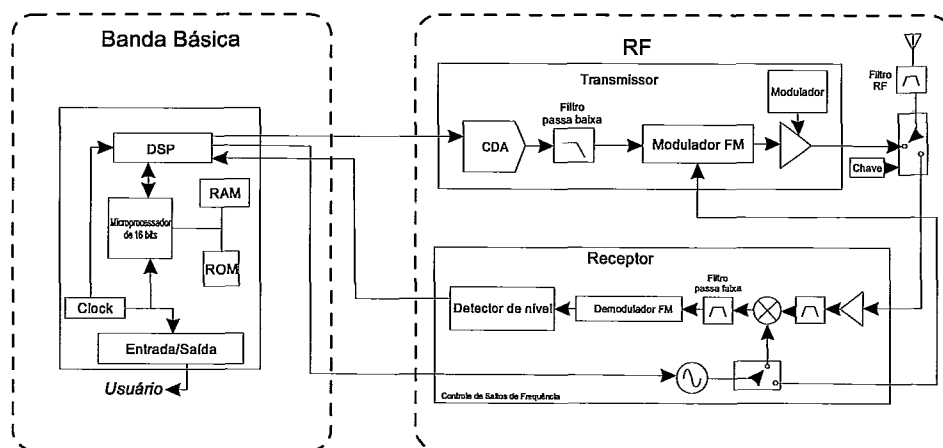


Figura 2.2: Diagrama da Banda Básica e da Banda de Rádio [2]

Tabela 2.2: Classes de Potência

Classes	Potência máxima de saída	Potência nominal de saída	Potência mínima de saída	Alcance
1	100mW (20dBm)	1mW (0dBm)	-	100m
2	2,5mW(4dBm)	1mW(0dBm)	0,25mW(-6dBm)	10m
3	1mW(0dBm)	-	-	0,10m

O dispositivo de classe 1 está habilitado a fazer o controle de potência. Este controle é usado para limitar potências de transmissão acima do nível de 0dBm. Abaixo deste nível o controle é opcional e pode ser usado para diminuir o nível de interferência. Este controle é monotônico e é realizado em passos de no máximo 8dB e no mínimo 2dB. O controle não atua se na conexão estabelecida entre os dois dispositivos somente um deles tiver esta função habilitada em sua configuração.

2.3.2 Banda Básica

O Bluetooth envia dados no formato de pacotes, onde a mensagem digital é dividida em diversos pequenos pacotes que são enviados um por um ao seu destino. Estes pacotes são enviados diretamente da fonte (mestre ou escravo) para o destino (escravo ou mestre), sempre passando por um mestre. Cada pacote é transmitido em um salto de frequência diferente.

A Banda Básica realiza funções como, montar os pacotes provenientes dos protocolos de nível mais alto e enviá-los à Banda de Rádio, receber os bits do rádio e montar os pacotes para serem processados pelas camadas mais altas, marcar o tempo dentro da piconet (Figura 2.4.a), fazer a seleção do salto de frequência, o processamento do canal de controle, controle de erro e realizar operações básicas de segurança. Ela funciona como um administrador (*Link Controller*) do enlace.

O modelo utilizado pelo Bluetooth para comunicação é o TDD (*Time-Division Duplex*) ilustrado na figura 2.3. Esta técnica separa slots de tempo para cada transmissor em um sistema de comunicação de duas vias, de modo que cada um faça a transmissão de dados em turnos. A comunicação entre dois dispositivos conectados entre si é então *half-duplex*, ou seja, enquanto um dispositivo está transmitindo o outro está recebendo e vice e versa.

O canal é dividido em unidades de tempo, cada um com a duração de $625\mu s$. Estes slots de tempo são numerados de acordo com o clock do mestre, na rede formada entre o mestre e escravo e seguem a sequência de 0 a $2^{27}-1$. Durante estes slots de tempo, o mestre e escravo podem transmitir pacotes.

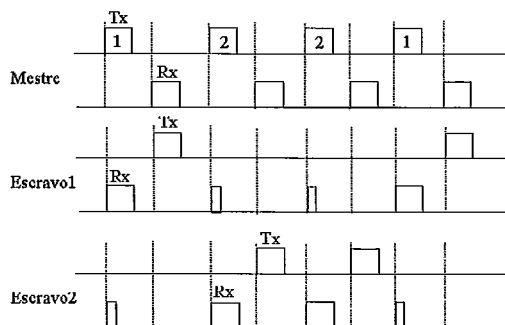


Figura 2.3: Diagrama de tempo por divisão

Numa conexão ponto-multiponto, o canal é compartilhado entre várias unidades Bluetooth. Quando duas ou mais unidades compartilham o mesmo canal, elas formam uma *piconet*, Figuras 2.4a e 2.4b. Uma unidade Bluetooth funciona como

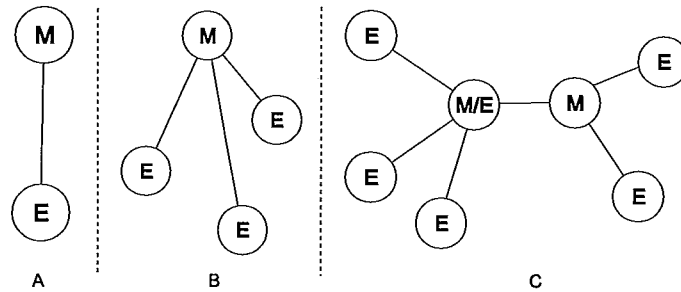


Figura 2.4: Tipos de formações da rede Bluetooth: Piconet e Scatternet

mestre da *piconet* e as outras unidades como escrava. Até sete escravas podem ficar ativas numa *piconet*, porém muito mais escravas podem permanecer sincronizadas ao mestre se elas se encontrarem em estado de *Park*, descrita adiante (seção 2.3.7.3). Em todos os casos, o acesso ao canal é controlado pelo mestre. Múltiplas *piconets* conectadas entre si, formam uma *scatternet*, Figura 2.4c. Cada *piconet* só pode ter um mestre, porém as unidades escravas podem participar de várias *piconets* e uma unidade escrava de uma rede pode ser mestre de outra *piconet* e cada uma com sua frequência de saltos.

Após estabelecida uma conexão, ela é caracterizada como Síncrona (*SCO - Synchronous Connection-Oriented*), usada em transmissões síncronas ponto-a-ponto como sinais de voz, que não permitem tratamento de erro e nem retransmissões, pois causaria um atraso no sinal que prejudicaria a qualidade da voz ou Assíncrona (*ACL - Asynchronous Connection-Less*), usada em transmissões assíncronas ponto-multi-ponto de dados e controle que realizam tratamento de erros e retransmissões.

2.3.3 Protocolo de Controle Lógico do Enlace - L2CAP

O protocolo de controle lógico de enlace (L2CAP) fornece serviços de conexão de dados com e sem conexão para as camadas superiores do protocolo. Ela executa funções de multiplexação, segmentação, controle de fluxo e de erro e gerenciamento de grupo. O L2CAP é utilizado para multiplexar canais lógicos em um único enlace físico.

2.3.4 Protocolo de Gerência de Enlace - LMP

O protocolo de gerência de enlace é responsável pela criação, modificação e liberação da conexão, assim como a atualização dos parâmetros relacionados às conexões entre os dispositivos.

O LMP permite a criação de novas conexões e transporte de dados quando requisitado, assim como o controle do enlace e atributos no transporte de dados, como a criptografia, a mudança na potência de transmissão e o ajuste da qualidade de serviço, através da administração dos intervalos de saltos.

2.3.5 Estabelecimento de Conexão

Ao ligar um dispositivo Bluetooth, ele entra em estado de *Espera* até que seus circuitos e programas sejam inicializados. Neste estado, o dispositivo pode seguir para os estados de *Page* ou *Inquiry* se o endereço do nó a quem ele irá se conectar for conhecido, como mostrado na figura 2.5.

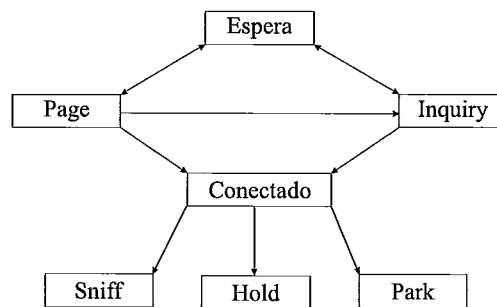


Figura 2.5: Estabelecimento de conexão

O procedimento de *inquiry* possibilita ao dispositivo, descobrir quais outros dispositivos estão ao seu alcance, seu endereço e "clock". Ao receber uma mensagem deste tipo, um dispositivo deve enviar como retorno um pacote contendo além de sua identidade, informação para sincronismo entre eles. Para evitar colisões, quando vários dispositivos estiverem respondendo, eles utilizam uma temporização aleatória. Somente o endereço é necessário para estabelecer uma conexão. Após realizar um *inquiry*, o dispositivo pode retornar ao estado de *espera* ou realizar um *page* para tentar estabelecer uma conexão *piconet* com a unidade escrava.

Para o procedimento de *page*, vários esquemas podem ser aplicados. Porém existe um esquema imperativo que é utilizado quando duas unidades se encontram pela primeira vez e neste caso o procedimento de *inquiry* é seguido pelo procedimento de *page*. Após realizada a conexão os dois dispositivos podem combinar a utilização de algum esquema de *page* opcional ou negociar algum dos três regimes de baixo consumo: *sniff*, *hold* ou *park*.

No estado de *Page*, o dispositivo transmite dois pedidos de conexão seguidos,

em diferentes portadoras a cada 1,25 ms. O dispositivo que envia o *page* transmite duas vezes um pedido de conexão e verifica também duas vezes se há respostas.

Para economizar energia, os dispositivos ociosos entram no estado de *Espera*, porém periodicamente eles devem "acordar" para verificar se existe algum dispositivo tentando estabelecer conexão. Esse evento que ocorre periodicamente é chamado de *Scan*, dura 10 ms e cada vez que este dispositivo desperta, ele verifica uma portadora diferente.

2.3.6 Controle de Energia

O Bluetooth disponibiliza a leitura de alguns parâmetros utilizados para controlar as conexões, entre eles estão o RSSI, TPL e LQ.

2.3.6.1 Indicador da Intensidade do Sinal Recebido - RSSI

O Indicador de Intensidade do Sinal Recebido é um parâmetro opcional do Bluetooth. Para que um transceptor possa fazer parte de um canal com potência controlada, ele deve ser capaz de medir a própria intensidade de sinal no receptor e determinar se o transmissor no outro lado da conexão deve aumentar ou diminuir seu nível de potência de saída.

Este parâmetro indica a diferença entre a intensidade do sinal medido na recepção e os limites que compõem o *Golden Receiver Power Range* (GRPR), Figura 2.6. Um valor positivo indica quantos dB's este sinal tem, acima do limite máximo do GRPR e um sinal negativo, quantos dB's abaixo do limite mínimo da faixa de GRPR.

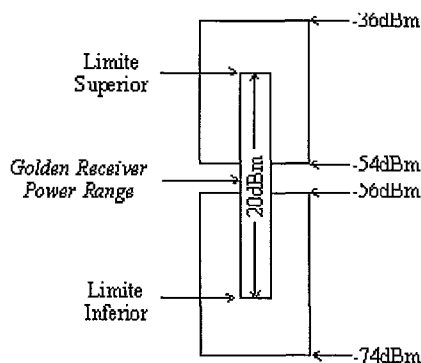


Figura 2.6: Faixa de alcance ótimo para sensibilidade de -80 dBm

O limite mínimo do GRPR corresponde à energia de recepção entre -56 dBm e 6 dB acima da sensibilidade do equipamento, que varia de fabricante para fabricante.

O limite máximo está 20 dB acima do limite mínimo, com uma acurácia de ± 6 dBm.

Equipamentos Bluetooth com controle de potência são capazes de otimizar o sinal de saída, utilizando os comandos do LMP (*Link Manager Protocol*) e realizando medições do sinal RSSI (*Receiver Signal Strength Indicator*), para determinar se a potência deve ser incrementada ou decrementada dentro de uma faixa de alcance ótimo GRPR. As mudanças na transmissão de potência do dispositivo local estão pré estabelecidas em uma tabela e são controladas pelo dispositivo remoto. O dispositivo remoto tem um Controle Automático de Ganho (CAG) com limites máximo e mínimo que definem o GRPR. Estes limites são definidos pelo fabricante obedecendo um padrão. Quando o RSSI esta fora do GRPR, a mudança é percebida pelo *Link Control* remoto, que manda uma requisição de mudança para o *Link Manager*. O LM então, manda uma mensagem com a mudança apropriada para a Banda Básica, que transmite para o dispositivo local (*LMP.incr.power.req* ou *LMP.decr.power.req*). O LM local muda a potência de transmissão somente para aquele dispositivo que mandou a mensagem de requisição (cada dispositivo tem sua configuração de transmissão de potência).

2.3.6.2 Nível de Potência de Transmissão - TPL

Este parâmetro indica o nível de potência do sinal de transmissão do circuito de rádio do Bluetooth, para um canal de comunicação específico. Este valor é mostrado na escala de dBm e pode variar de -30 dBm a 20 dBm, onde $P(dBm) = 10 * \log(P(mW))$.

2.3.6.3 Qualidade do Link - LQ

Este parâmetro indica o valor da qualidade de conexão de um dispositivo em um canal. Ele varia de 0-255 e quanto maior o valor medido, melhor é a qualidade de comunicação. Cada fabricante de equipamentos Bluetooth utiliza um algoritmo diferente para medir este índice, porém todos eles usam a Taxa de Erro de Bit (BER) como variável deste cálculo.

2.3.7 Regimes de Baixo de Consumo

A banda Básica dispõe de técnicas de retransmissão de pacotes e de correção de erros para fornecer robustez e confiabilidade ao Bluetooth. A retransmissão é o meio mais simples de se recuperar totalmente um pacote defeituoso. Porém, o processo

chamado de FEC (*Forward Error Correction*) é uma alternativa onde o dispositivo destinatário da mensagem consegue realizar um número limitado de correções de blocos por pacote sem pedir a retransmissão deste. Isto ocorre porque o pacote carrega uma informação extra gerada por um algoritmo de correção de erro e esta informação ao ser aplicada novamente pelo algoritmo, na unidade de destino é capaz de recuperar alguns blocos. Isto reduz os atrasos nas mensagens que possam ser causados por distorções dos pacotes gerados pelo ambiente, evitando retransmissões e economizando energia. Sendo assim, o FEC pode ser encarado como um método para economizar energia pelo Bluetooth.

Os demais métodos de controle de consumo correspondem aos modos de funcionamento em regime de baixo consumo de energia descritos a seguir. Eles tentam realizar uma administração mais inteligente da Banda de Rádio, controlando os instantes em que os circuitos de transmissão e recepção devem ser ligados e desligados, afim de reduzir o tempo de serviço e economizar energia.

2.3.7.1 Regime de funcionamento *Sniff*

Neste modo, o ciclo de trabalho para escuta ou recepção da unidade escrava pode ser reduzido. Dentro deste intervalo o dispositivo estaria em modo *dormindo*. O slot de tempo em que o mestre pode começar uma transmissão para uma escrava específica é reduzido, isto é, o mestre só pode começar uma transmissão em intervalos de tempo pré-estabelecidos com a unidade escrava e esta, por sua vez, reduz o tempo dedicado para escutar esta transmissão e aumenta o intervalo de tempo para o próximo instante onde ela irá novamente escutar o mestre. Estes intervalos são chamados de *sniff attempt* ($t_{sniffattempt}$) e *tempo de sniff* (T_{sniff}), respectivamente.

2.3.7.2 Regime de funcionamento *Hold*

No regime Hold o dispositivo entra em modo de baixo consumo, desliga seu receptor e transmissor de maneira a não executar qualquer função Bluetooth durante esse período, para um determinado canal, restando somente atividades dentro dos demais intervalos de tempo definidos para outros canais aos quais ele já tenha se conectado. O dispositivo entra neste estado por tempo determinado e é acordado pelo mestre, não perde seu endereço lógico na rede, mas perde o sincronismo com o mestre, que ao terminar o tempo de *hold* é recuperado.

2.3.7.3 Regime de funcionamento *Park*

O equipamento entra em modo de baixo consumo por tempo indeterminado. Libera seu endereço na piconet, mas permanece sincronizado, para uma reativação futura. Em intervalos de tempo regulares ele acorda para re-sincronizar e checar por mensagens *broadcast*.

Além das políticas apresentadas para economia de energia utilizadas pelo Bluetooth, o modo Ativo (ou ideal) também procura reduzir o consumo, realizando sua varredura padrão da sua faixa de frequência para procura de novas conexões, a cada 1,28 ou 3,84 s com duração de $10\mu s$. Este modo de conexão também minimiza o consumo realizando transmissões somente quando a informação estiver disponível e se alguma informação de controle precisar ser enviada (ACK/NACK), que são feitas através de um pacote vazio. Periodicamente o mestre envia um pacote nulo para as escravas para re-sincronização [15].

2.4 Propagação e Atenuação do Rádio

Os mecanismos que regulam a propagação de onda no ambiente, podem ser agrupados em três categorias que traduz o fenômeno eletromagnético: Reflexão, Difração e Espalhamento.

- Reflexão ocorre quando a onda eletromagnética atinge um objeto de dimensão maior que seu comprimento de onda (λ).
- Difração é causada por objetos de arestas finas localizados no caminho da onda entre o transmissor e receptor, ou seja, localizados na linha de visada.
- Espalhamento ocorre quando vários pequenos objetos, em comparação ao seu comprimento de onda, estão no caminho do sinal.

Isto mostra que a propagação de onda é um fenômeno extremamente complexo, influenciado por diversos fatores ambientais que tornam sua modelagem ainda mais complexa.

O modelo de atenuação da potência de transmissão com a distância no espaço livre, pode ser usado para se prever a potência de transmissão quando o caminho entre transmissor e receptor está livre e desobstruído. Isto pode ser observado na equação 2.1 elaborada por H.T. Friis [9].

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (2.1)$$

Onde a potência P_r é diretamente proporcional a potência de transmissão P_t , ao ganho da antena de transmissão G_t , ao ganho da antena de recepção G_r e a λ e inversamente proporcional ao quadrado da distância d . Como em [21], é possível simplificar a função P_r para,

$$P_r(d) = C_f \frac{P_t}{d^2} \quad (2.2)$$

de modo que C_f é uma constante que depende das características do transmissor e receptor. Combinando a equação 2.2 com o conceito de que a conexão só irá se estabelecer se a potência recebida P_r estiver acima de um determinado valor (limiar de sensibilidade) é possível dizer que a área de cobertura do sinal P_t é um esfera de raio $d \ll \sqrt{C_f P_t}$. Esta equação de atenuação do espaço livre é válida para pontos distantes da antena transmissora, caso contrário essa atenuação pode ser considerada constante.

Em muitas situações reais, o modelo de propagação no espaço livre pode ser muito impreciso. Para tentar uma melhor aproximação de um cenário prático o Modelo de Dois Caminhos [21] considera a reflexão causada pela superfície do chão.

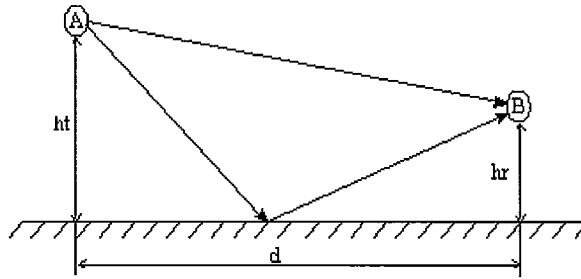


Figura 2.7: Modelo de Propagação por 2 caminhos

O sinal enviado pelo ponto A atinge o ponto B por dois caminhos, uma linha direta de A para B e pela reflexão do chão. Na figura 2.7 este modo é expresso na equação 2.3

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (2.3)$$

onde h_t e h_r representam a altura entre o chão e o transmissor A e entre o chão e o receptor B, respectivamente. Se as distâncias forem muito grandes entre A e B

($d \gg \sqrt{h_t h_r}$) ao reunir as características da transmissão sob uma constante C_t é possível simplificar 2.3 para

$$P_r(d) = C_t \frac{P_t}{d^4} \quad (2.4)$$

O modelo de perda para grandes distâncias, da equação 2.5 foi apresentado em [21]. Ele combina resultados experimentais e análises feitas em campo, indicando que a perda é proporcional a distância de separação elevada ao Expoente de Perda, γ . A tabela 2.3 mostra alguns valores para o Expoente de Perda obtidos através de experimentos.

$$P_r(d) \propto \frac{P_t}{d^\gamma} \quad (2.5)$$

Neste modelo é possível perceber que a intensidade do sinal de emissão decai conforme o ambiente em questão. A Equação 2.5 representa o modelo de propagação de onda adotado nesta dissertação: Circular no espaço bidimensional; esférico no espaço tridimensional, onde a onda se propaga igualmente em todas as direções de acordo com [7]. Logo o estabelecimento da conexão entre dois nós pode ser previsto se conhecermos o modelo de perda com a distância e a potência de transmissão. Se podemos prever a conexão, pode-se estimar o gasto de energia.

Tabela 2.3: Valores Medidos de γ

Ambiente	γ
Espaço Livre	2
Área Urbana	2,7 - 3,5
Ambiente Fechado com linha de visada	1,6 - 1,8
Ambiente Fechado sem linha de visada	4 - 6

2.5 Trabalhos Relacionados

A pesquisa na área de consumo de energia para redes de comunicação sem fio, abrange suas diversas aplicações, porém cada uma delas tem sua particularidade quanto a implementação do modelo de consumo de energia.

2.5.1 Alguns Modelos de Consumo de Energia

A economia no consumo de energia é um parâmetro de avaliação para redes sem fio, tão importante quanto as medidas de atraso de pacotes e taxa de transferência, usadas em redes convencionais. Por esse motivo é importante desenvolver modelos capazes de prever o consumo de energia em todas as etapas da comunicação, para os diferentes modos de operação e dentro das diversas variáveis impostas pelo ambiente da aplicação.

Geralmente os dispositivos de comunicação sem fio tem 4 modos de operação:

- Ativo: O rádio está ligado mas fora de operação.
- Transmitindo(T_x): O rádio está transmitindo uma informação.
- Recebendo(R_x): O rádio está recebendo uma informação.
- Dormindo: O rádio está em regime de baixo consumo de energia.

A potência consumida por unidade de rádio frequência (RF) é só uma parte da energia gasta pelo dispositivo de transmissão. Um equipamento completo de comunicação sem fio, tem um gasto elevado ao ligar outros circuitos analógicos e digitais. Neste caso, a modelagem do consumo quando o nó não está transmitindo com a potência máxima, é pouco eficiente e algumas aproximações consideram as funções de perda com a distância, apresentadas na seção 2.4 e ditam que o consumo deve ser diretamente proporcional a d^γ ou consideram somente o consumo do RF dentro dos estados de Ativo, Dormindo, Transmitindo e Recebendo.

Em [21], o modelo de consumo de energia convencionado o valor 1 para o estado ideal de funcionamento, 1.x no estado de recebimento, 1.y no estado de transmissão e 0.z para a potência consumida em modo de baixo consumo. Este sistema de peso proposto, supõe que o consumo está relacionado ao seu estado ativo com o valor 1, ao estado dormindo com o valor 0,09, recebendo com o valor 1,07 e transmitindo com o valor 2,02. No entanto, o valor relacionado a potência de transmissão (2,02), se refere a energia consumida para uma transmissão usando a potência máxima, fato que não ocorre para todas situações reais de operação.

Em [20] os autores utilizam a taxa de atividade, em simulações de comunicação entre dispositivos sem fio. Essa taxa correlaciona o consumo de energia com o número de bytes transmitidos e o tempo gasto para transmitir, ver equação 2.6,

onde En representa o consumo de energia em *Kbytes* por unidade de energia. Assim, obtém-se uma correlação simples mas que não identifica a variação do gasto de energia no instante da recepção nem a variação do consumo provocado por outros eventos do protocolo, como a janela de tempo dedicada a varrer outros canais.

$$Consumo\ de\ Energia(En) = \frac{bytes\ transmitidos}{tempo\ de\ atividade} \quad (2.6)$$

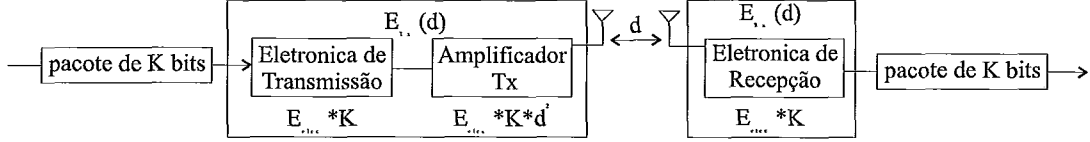


Figura 2.8: Modelo RF de 1ª Ordem

Em [11], o sistema proposto para caracterizar o consumo de energia, representado na figura 2.8 é descrito pela equação 2.7, que indica ser possível verificar que o recebimento de mensagens não é uma operação de baixo custo de energia. Assim supõem-se que o protocolo minimize o efeito da distância de transmissão, com o número de transmissões e recepções para cada mensagem.

Esta proposta sugere que em condições reais não há simetria entre as transmissões e recepções de um ponto A para um ponto B, ou seja, a energia para transmitir de A para B pode não ser a mesma para transmitir de B para A.

$$E_{Rx} = E_{elec} \cdot K \quad (2.7)$$

O mesmo modelo de 1ª ordem de propagação de RF na figura 2.8, também é usado por [22] em seu sistema para descrição da energia consumida, através da equação 2.8, onde N_{tx} indica a quantidade de chaveamentos do circuito RF para transmissão e N_{rx} , a quantidade de chaveamentos para recepção.

$$E = E_{tx} + E_{rx} = N_{tx}e_{tx} + N_{rx}e_{rx} \quad (2.8)$$

O modelo apresentado em [17] foi construído a partir de uma série de experimentos em campo onde ele observou e mediu o comportamento do gasto de energia de um dispositivo Bluetooth transmitindo, recebendo e operando em regime de baixo consumo dentro de uma piconet. Esse modelo mostra a diferença entre o consumo do mestre e do escravo, considerando o número de conexões ativas e o regime de baixo consumo como resultado, foi apresentado na tabela 2.4 cujos valores serão

empregados nas equações 2.9 [16]. Nestas equações, $P_{M,SN}$ indica a potência consumida pela conexão mestre-escravo, P_{sniff} a potência consumida no estado de baixo consumo de energia, P_{BAS} a potência básica e SA, SI e ST são os tempos de configuração do regime de baixo consumo, tempo de escuta, intervalo de escuta e tempo máximo de espera respectivamente que expressam o comportamento de consumo na piconet montada para o experimento.

Atividade	Descrição	Valor
P_{stdy}	Sempre presente	44,58mW
P_{mestre}	Ser mestre de 1 escravo	12,97mW
$P_{ad.esc}$	Adicionar um escravo	4,55mW
P_{esc}	Ser escravo	56,63mW
P_{snif}	Valor de pico no regime Sniff	86,96mW

Tabela 2.4: Valores de Consumo para BNode [17]

$$\begin{cases} P_{M,SN} = (P_{sniff} - P_{BAS}) \cdot \frac{SA}{SI} \\ P_{S,SN} = (P_{sniff} - P_{BAS}) \cdot \frac{SA}{SI} + (P_{esc} - P_{BAS}) \cdot \frac{ST}{SI} \end{cases} \quad (2.9)$$

Este modelo porém não considera que em cada ambiente onde o equipamento está localizado terá uma interferência diferente sobre o seu consumo e alguns parâmetros elétricos são intrínsecos ao fabricante do dispositivo e ao computador utilizado para estimular o Bluetooth, como o “offset” de alimentação ou P_{bas} , do circuito eletrônico interno ao dispositivo, que varia de fabricante para fabricante.

O trabalho em [13] mostra que ao contrário do que muitos outros modelos indicam, o impacto do gasto de energia durante a transmissão é pequeno quando comparado ao gasto total dado pela soma individual dos gastos de energia dos demais eventos do dispositivo sem fio durante o processo de comunicação. Ele também mostra que o custo energético de transmissão cresce linearmente com o tamanho da rede e que a transmissão de grandes pacotes é energeticamente mais eficiente em condições de saturação. O modelo apresentado usa uma aproximação similar a [5], porém considera a energia de todos os estados da banda de rádio e os regimes de baixo consumo e é expresso pela equação 2.10.

$$E_y = \alpha_y * t_y, \quad (2.10)$$

onde E_y representa o consumo de energia, α_y indica a potência dissipada no estado y e t_y indica o tempo de duração do estado y (Transmissão, Recepção, Scan etc...).

Porém seu cálculo para o tempo está baseado somente no *Tamanho do pacote / Taxa de Transmissão*, mas este tempo também varia com a distância entre os dispositivos e a intensidade das reflexões causadas pelos obstáculos do ambiente.

É fundamental que se tenha um modelo de energia preciso para a predição do consumo de energia [14]. Dependendo do cenário e da diversidade da rede a aproximação mais comum de consumo de energia considera somente o consumo do transmissor. Como já foi dito, a geografia da rede é um dos principais problemas para se otimizar o uso de energia na comunicação. O sistema de medida de energia que propomos nesta dissertação reúne em uma modelagem simples, todas as variáveis de ambiente e as mudanças de consumo ocasionadas pelas variações no regime de gasto de energia, como previsto nos próximos capítulos.

Capítulo 3

Sistema para Medição de Consumo de Energia em Equipamentos sem Fio

Neste capítulo os conceitos introduzidos aqui obedecem os princípios físicos da propagação de onda de rádio seção 2.4, que é o meio pelo qual os equipamentos estudados nesta dissertação utilizam para realizar a comunicação sem fio.

Um canal de comunicação sem fio, entre A e B só irá se estabelecer se e somente se a potência recebida (P_r) por B estiver acima de um limiar chamado *Limiar de Sensibilidade* (β). Ou seja, existirá um canal direto de comunicação entre A e B se $P_r \geq \beta$. O valor de β depende das características do transmissor e receptor do equipamento de comunicação sem fio e da sua taxa de transmissão, quanto maior a taxa, maior o valor de β .

Nosso Sistema para Medição do Consumo de Energia em Equipamentos Sem Fio (SMCEESF) é composto pela Unidade de Medida Direta de Consumo (UMDC) e o modelo de consumo de energia En_{con} , descritos a seguir.

3.1 Unidade de Medida Direta de Consumo - UMDC

É essencial que os algoritmos que buscam economia de energia para tecnologia de comunicação sem fio, sejam baseados nos modelos de onda do equipamento onde eles serão aplicados [14].

Com o objetivo de construir o modelo de onda de um sistema de comunicação sem fio, desenvolvemos um pequeno e simples circuito de aquisição capaz de capturar as variações de intensidade da corrente consumida pelo equipamento, sempre que este responder a qualquer estímulo interno ou externo, referente às mudanças de estado

e regime de funcionamento. Este sistema de conversão é chamado de Unidade de Medida Direta de Consumo (UMDC) é mostrado na figura 3.1.

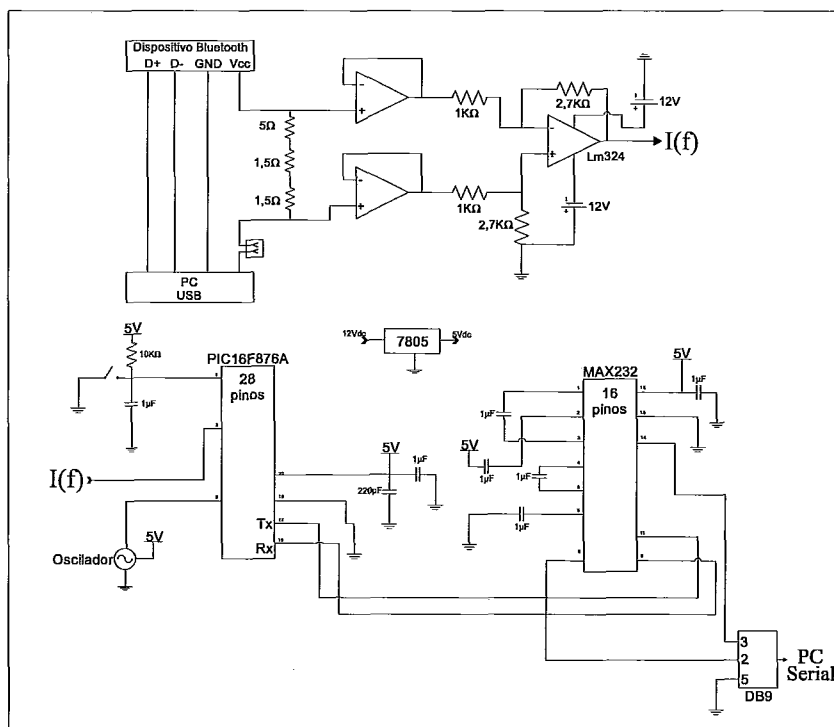


Figura 3.1: Unidade de Medida Direta de Consumo

A UMDC é conectada em série com a fonte de alimentação do equipamento sem fio e através de uma interface analógica ela mede as variações de corrente do equipamento. Essas medidas são transformadas em palavras digitais de 8 bits e enviadas para um computador através da porta serial de comunicação, a uma taxa de transferência de 57,6 Kbps. O computador armazena essas informações em disco para posteriormente analisá-las e traduzí-las em consumo de energia por evento de comunicação do equipamento sem fio.

Usando o sistema mostrado na figura 3.2, o computador que armazena as informações de variação de consumo também controla o equipamento de comunicação sem fio, permitindo assim que exista um sincronismo entre os eventos de comunicação e a captura da variação de consumo neste instante. Este sistema também pode ser replicado para outros nós escravos ou mestres, sem a necessidade de implementar qualquer modificação do sistema.

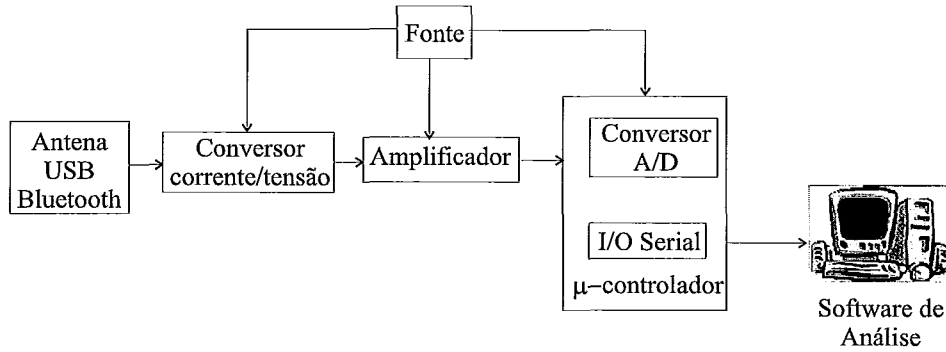


Figura 3.2: Fluxograma do Sistema de Aquisição

3.2 Modelo de Consumo de Energia

Como mostrado na seção 2.4, o Modelo de Perda de Espaço Livre pode ser um caminho para uma melhor modelagem do consumo de energia, porém ele se torna ineficiente quando é necessário levar em consideração as diferenças e perdas provocadas pelas modificações do ambiente e a topologia da rede da qual os equipamentos sem fio fazem parte.

Todos os modelos apresentados até agora (seção 2.5.1) conseguem uma boa aproximação ao modelar as variações dos estados de transmissão e recepção durante a montagem de uma piconet ou seja, a transferência de informação entre nós, a adição de novos nós e a eventual perda e recuperação de uma conexão e até o comportamento de alguns regimes de baixo consumo. Porém estes modelos enfrentam dificuldades para conseguir modelar comportamento das variáveis físicas, especialmente Reflexão, Difração e Espalhamento impostas pelo cenário onde o equipamento irá operar e que são responsáveis por provocar atrasos e retransmissões.

Com o objetivo de equacionar tais dificuldades, o sistema de medida que propomos (SMCEESF) faz uso da informação de variação da corrente de alimentação do equipamento sem fio, como principal mecanismo de observação das variações de consumo gerados pelos diferentes tipos de cenários e ambientes onde ele se localiza, independente do tipo de protocolo usado para comunicação ou tipo de equipamento. É uma modelagem simples que usa uma aproximação semelhante a [17, 13], porém captura a interação complexa entre os componentes de *hardware* e *software*, o meio ambiente e as transições entre os modos de consumo. Desta maneira, o sistema de medida oferece ao pesquisador uma ferramenta simples para várias aplicações em ambiente de comunicação sem fio, incluindo o desenvolvimento de algoritmos para

redução de consumo de energia e dimensionamento da bateria, taxa de aquisição e formação dos dados para comunicação.

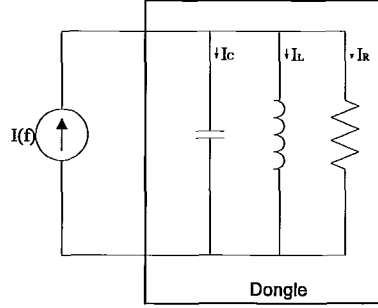


Figura 3.3: Circuito Ressonante Paralelo

Com base nas técnicas mostradas até agora, em alguns testes experimentais e usando também como inspiração o modelo de circuito ressonante paralelo [6] mostrado na figura 3.3, onde os elementos ativos e passivos do circuito podem facilmente ser associados a, fonte, antena, circuitos digitais e analógicos de um equipamento de comunicação sem fio. É fácil perceber que a variação da corrente esta diretamente ligada as variações de tensão de modo a influenciar o consumo de energia dos demais componentes. Logo é possível afirmar que:

- A Corrente consumida varia de acordo com as mudanças de estados.
- A Potência consumida pelo dispositivo de comunicação sem fio é a soma das potências consumidas, quando ele esta no estado ativo sem conexão, mais a potência do estado *scan*, *page* e *inquiry*, mais a potência consumida no estado ativo e conectado, no estado de transmissão e no estado de recebimento.

Estas afirmações podem ser traduzidas na seguinte equação:

$$En_{con} = I(f)*t_{at.s.con} + I(f)*t_{scan} + I(f)*t_{ativo} + I(f)*t_{sniff} + I(f)*t_{hold} + I(f)*t_{park} + En_{base}, \quad (3.1)$$

onde En_{con} é o consumo de energia total do dispositivo, $I(f)$ representa a variação da corrente consumida em função das variações de estados e ambiente do equipamento sem fio, $t_{at.s.con}$, t_{scan} , t_{ativo} , t_{hold} e t_{park} indicam o tempo em milisegundos de duração de cada estado, ativo sem conexão, *scan*, ativo conectado, *hold*, *sniff* e

park respectivamente. O nível de consumo mínimo inerente a cada equipamento, que varia para cada tipo, modelo e fabricante é representado por En_{base} .

Deste modo o valor de En_{con} é capaz de perceber as variações definidas pelo mestre e escravo, distância, número de conexões ativas, ambientes fechados e abertos. O que torna possível verificar também, atrasos nas trocas de mensagens e reflexões causados pela geografia do ambiente.

A figura 3.4, foi montada a partir dos sinais capturados pela UMD. Esta figura representa a curva característica de cada estado pelo qual o dispositivo sem fio passa, desde o seu estado de Espera até o estabelecimento de conexão e transmissão da mensagem.

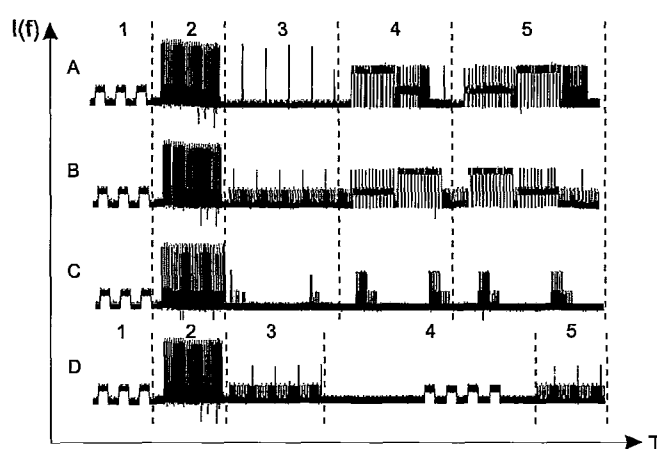


Figura 3.4: Curvas de variação de corrente $I(f)$ em mA capturadas pela UMD

A curva A da figura 3.4 trecho A-1, apresenta o mestre no estado de Espera. No trecho A-2, realizando um "Scan", no trecho A-3 conectado com um escravo e no trecho A-4 e A-5, enviando uma mensagem e recebendo uma mensagem, respectivamente. A curva B da mesma figura mostra os mesmos estados relativos a um escravo, porém no trecho B-4 ele recebe uma mensagem e no trecho B-5 ele envia uma mensagem e o trecho B-3 representa apenas o estado de conexão com o mestre. A curva C da figura 3.4 no trecho C-3 representa este escravo em estado de Sniff e o trecho C-4 e C-5, indicam seu comportamento quando esta enviando e recebendo uma mensagem sob o estado de Sniff, respectivamente.

A curva D da figura 3.4 trecho D-4, representa este mesmo escravo em estado de Hold. Todas as funções param e o dispositivo passa apenas a ligar seu rádio dentro de uma janela de tempo de 10 *ms* a cada 1,25 *s* para escutar informações de outros canais.

Para corroborar as afirmações acima, foram realizados diversos experimentos operacionais em ambiente externo e laboratorial onde fosse possível montar cenários, usando equipamentos de comunicação sem fio, que refletissem situações reais de funcionamento e operação. O capítulo seguinte descreve esses diversos ambientes de testes.

Capítulo 4

Metodologia Experimental

Para realizar os experimentos foi escolhido o protocolo de comunicação sem fio *Bluetooth* disponível em equipamentos do Laboratório de Computação Paralela COPPE/UFRJ. Esta escolha foi baseada na sua popularidade, na grande quantidade de informações disponíveis na Internet sobre suas diversas configurações, na fácil operação e a disponibilidade de pronta leitura de informações relativas à potência de transmissão (TPL) e indiretamente de recepção (RSSI).

Foram criadas diversas ferramentas para auxiliar os experimentos em diferentes ambientes e cenários, entre elas se destacam duas novas funções “Power” e “Pwrplus”, criadas para a interface de operação do Bluetooth (*hcitool*) sobre a plataforma BlueZ Linux. A função “Pwrplus” é responsável por ler as informações, TPL, LQ e RSSI no instante em que elas estão disponíveis, marcar o tempo de aquisição e armazená-las em disco. A função “Power” faz a leitura da porta serial, que traz a informação do consumo de energia naquele instante, também marca o tempo de aquisição e faz a gravação em disco destas informações, ao mesmo instante que a função “Pwrplus” está em operação. Também foram criados programas para inicialização dos dispositivos Bluetooth, configuração das suas funções de operação, dos regimes de funcionamento a serem testados e estímulos para o transporte de mensagens.

4.1 Experimentos e Medidas

Todos os experimentos consistiram em realizar medidas de consumo de energia utilizando a UMD e os programas descritos acima, que devidamente sincronizados passam a fornecer informações suficientes para uma análise da potência total consumida pelo dispositivo, da potência de transmissão fornecida pelo parâmetro TPL, da indicação de qualidade da conexão mostrada no valor de LQ e da potência de

recepção calculada através de RSSI.

Como o parâmetro RSSI disponibilizado pelo Bluetooth não indica o valor absoluto da potência de recepção, mas a diferença entre a potência recebida e a faixa *Golden Receive Power Range*, nesta dissertação ele será chamado de dRSSI, para que não seja confundido com o parâmetro RSSI utilizado em diversas áreas para indicar o valor absoluto da potência de recepção de um sinal RF.

Os experimentos têm como objetivo caracterizar as curvas de consumo que o nosso sistema de medida se dispõe a descrever através da função $I(f)$ e o modelo de consumo En_{con} . Assim será possível observar a variação do consumo com a mudança de ambiente e o regime de funcionamento. Para tal, foram realizadas medidas em dois tipos de ambientes (Interno e Externo) e em seis configurações de cenários.

O dispositivo Bluetooth utilizado em todos os experimentos é um adaptador Bluetooth USB classe 1 modelo USB-BT1, com chip CSR BlueCore 02, sensibilidade de $-80dBm$ em 0,1% de BER e consumo médio de $200mA@5V$.

4.2 Cenário I - Campo Aberto

Este cenário está localizado dentro do campus da UFRJ, na Praça dos Bombeiros próximo ao Alojamento dos Alunos. Ele consistiu de uma área aberta com aproximadamente 150m de comprimento por 70m de largura a céu aberto e sem nenhum obstáculo na linha de visada. Neste cenário, o modelo de atenuação da potência de transmissão, que considera a reflexão no chão para o cálculo da potência de recepção pode ser comparado indiretamente com o valor de dRSSI.

As medidas realizadas utilizaram dois *Laptops*. Um para servir de mestre e outro de escravo. A máquina mestre foi um Toshiba Satellite Pentium III de 1,1 GHz, 11 GB de HD e 256 MB de memória RAM. A máquina escravo foi um Toshiba Intel Celerom de 1,6 GHz, 20 GB de HD e 256 MB de memória RAM. Como as baterias dos Laptops não duram mais de uma hora, estes foram ligados a *Nobreaks* que funcionaram como baterias auxiliares e também alimentaram as UMDC's.

Após montar as UMDCs nos dispositivos Bluetooth e Laptops, uma piconet foi criada entre os dois dispositivos e os programas de controle, "Power" e "Pwrplus" foram inicializados, em conjunto com outro programa desenvolvido para gerar as mensagens e transmiti-las via Bluetooth, seguindo a direção do escravo para o mestre.

Com os dispositivos operando em modo Ativo, foram transmitidos 60 pacotes de 4 KB, a cada 3 m de distância entre eles, até a queda da conexão, ocorrida à 108 m de distância. Os resultados obtidos são apresentados a seguir na forma de gráficos.

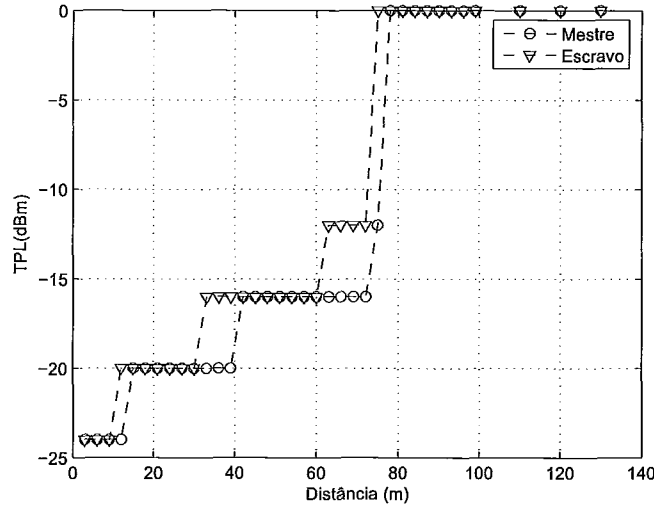


Figura 4.1: Mestre e Escravo - TPL - Cenário I

A figura 4.1, mostra a intensidade da potência de transmissão (TPL) do escravo e mestre. A variação de TPL ocorre para compensar a atenuação com o aumento da distância sofrido pela potência do sinal recebido no mestre. Com o controle de energia sempre atuante nesta classe de dispositivo Bluetooth, o valor de TPL será o menor possível para manter a conexão, neste regime de funcionamento. Quando este valor chega a 0 dBm e a distância continua aumentando, os valores amostrados de dRSSI passam a apontar um afastamento cada vez maior do ponto ótimo (0 dBm), indicando que a frequência de amostras muito menores que zero está muito alta, prejudicando a conexão e tornando necessário aumentar a potência de transmissão.

A figura 4.2 descreve o comportamento do parâmetro $I(f)$, medido na UMDC, segundo a variação da distância. Esta curva indica que a UMDC foi capaz de perceber a variação do consumo destes dispositivos durante o afastamento dos equipamentos sem fio, dentro deste ambiente sem obstáculos. Esta variação ocorre em degraus semelhantes a variação do aumento da potência de transmissão indicado por TPL, isto mostra que este aumento de potência tem um grande peso no consumo do dispositivo.

A figura 4.3, indica o tempo total gasto pelo rádio do dispositivo durante a

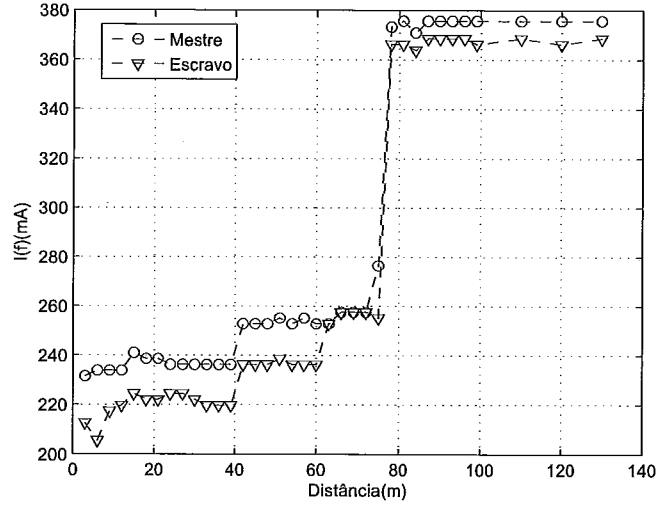


Figura 4.2: Mestre e Escravo - $I(f)$ - Cenário I

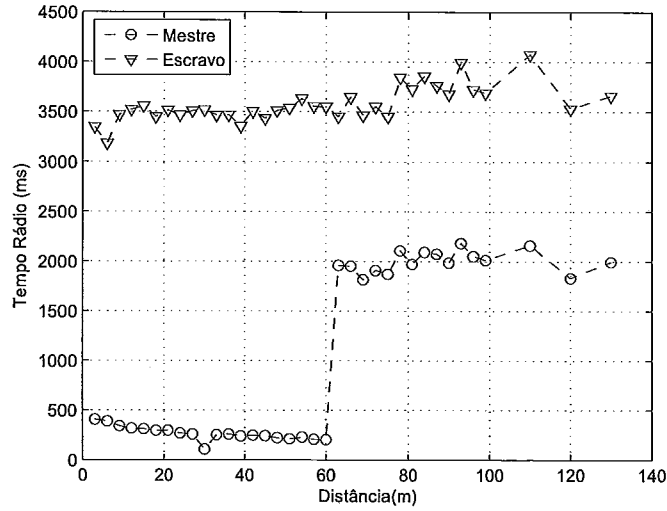


Figura 4.3: Soma do tempo que o Rádio ficou ligado em Tx e Rx - Cenário II

transmissão e recepção de cada elemento da piconet para cada ponto de medida, ou seja, é o tempo que o rádio esteve ligado para transmitir e receber. A curva esperada deveria mostrar uma variação pequena deste tempo, com o aumento da distância, devido à constante taxa de transmissão e tamanho do pacote transmitido, como pode ser observado na curva do escravo. As pequenas variações de tempo podem ser explicadas pelo pequeno atraso causado com o aumento da distância entre os pontos e a política de recebimento de mensagem usado pelo Bluetooth, na qual

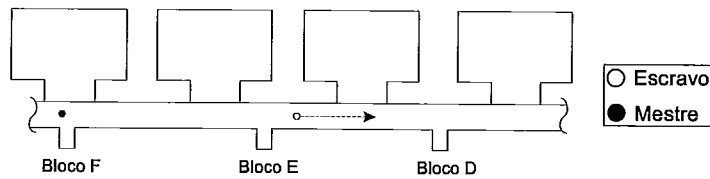


Figura 4.4: Corredor do Bloco I-2000

ele aumenta o tempo de recepção ou transmissão para um determinado canal que ainda não finalizou o envio ou recepção da mensagem, em até 5 unidades de tempo Bluetooth ($5 * 625\mu s$).

A pequena queda de tempo apresentada nos primeiros 60m do mestre e o salto de tempo após este ponto foram provocados pela sucessiva queda na qualidade do canal de comunicação e possível perda de pacotes, tolerada pelo dispositivo até alcançar os 60 m. Com a perda de pacotes, o mestre não liga seu transmissor para enviar a confirmação a cada trecho de pacote recebido, assim o tempo registrado caiu.

4.3 Cenário II - Corredor

Neste cenário foram utilizados os mesmos equipamentos do Cenário I o mesmo roteiro de testes, programas e configurações. Este corredor esta localizado no segundo andar do Bloco I-2000 no prédio do Centro de Tecnologia da UFRJ, figura 4.4. O experimento consistiu em montar a piconet em frente à entrada do Bloco F, mantendo o mestre fixo e deslocando o escravo até que sua conexão com o mestre fosse perdida. Estas medidas geraram as seguintes curvas:

Em comparação com as curvas características do cenário anterior, observamos comportamentos semelhantes, como o salto do valor de $I(f)$ ao passar dos 80 m, mostrado na figura 4.6. Este salto também é observado na figura 4.5, quando o mestre após 80m de baixa potência de transmissão, recebe o comando para aumentar sua energia de transmissão do escravo e continuar a transmitir as mensagens de confirmação para cada trecho de pacote recebido.

O ambiente do corredor não tem obstáculos a frente, mas possui paredes laterais e teto, esta construção pode provocar o efeito “guia de onda” no sinal transmitido e provocar reflexões do sinal que possam prejudicar o recebimento da mensagem e variações no tempo que o rádio receptor deve ficar ligado.

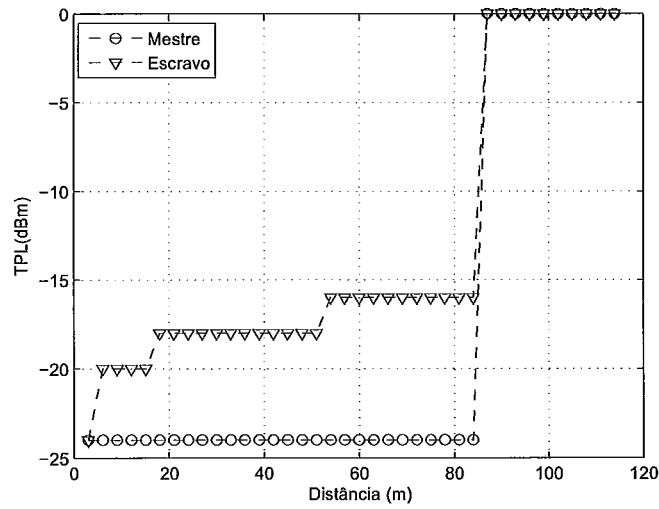


Figura 4.5: Mestre e Escravo - TPL - Cenário II

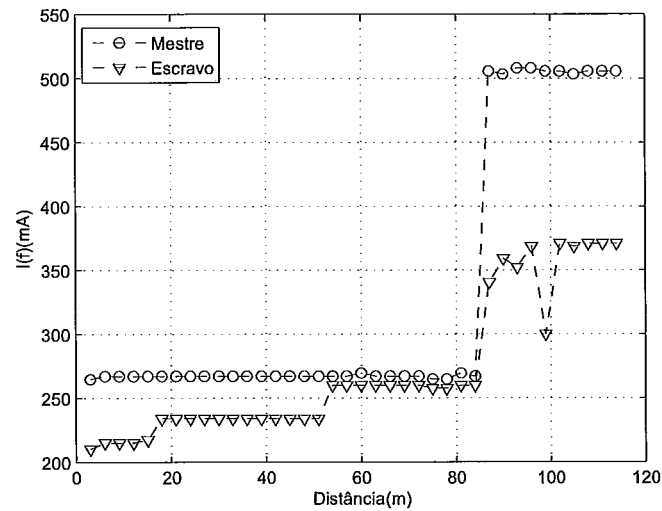


Figura 4.6: Mestre e Escravo - I(f) - Cenário II

Neste cenário está mais claro a diferença no comportamento entre escravo e mestre, dentro de um mesmo ambiente. Este fato é comparado com o gastos de energia distintos, como mostrado na figura 4.6 através do parâmetro $I(f)$. A figura 4.7, mostra que o mestre e escravo, em comparação com o ambiente aberto, passam mais tempo com o rádio ligado, o escravo mais que o mestre. Também notamos uma variação maior do tempo de rádio ligado com o aumento da distância, que indicam um peso maior neste ambiente do efeito da reflexão.

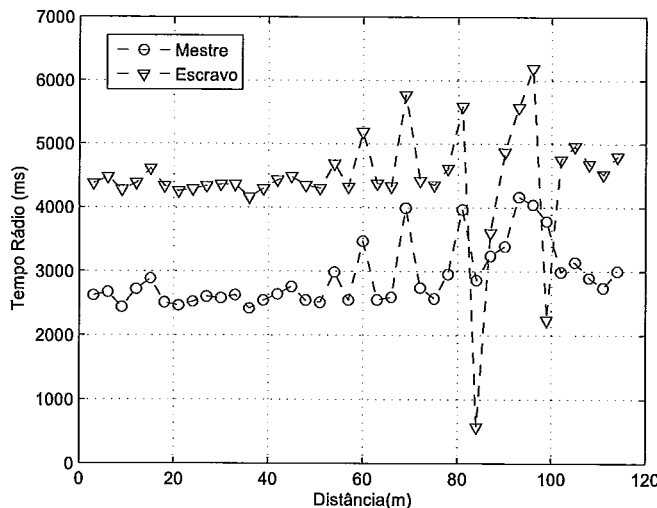


Figura 4.7: Soma do tempo que o Rádio ficou ligado em Tx e Rx - Cenário II

4.4 Cenários com Obstáculos - LCP

Os cenários que se seguem estão localizados dentro do Laboratório de Computação Paralela (LCP) da UFRJ. A dimensão do LCP é de aproximadamente 14m de comprimento por 14m de largura, com armários, computadores, mesas, divisórias de vidro e madeira prensada, atuando como obstáculos a comunicação sem fio, como mostra a figura 4.8.

Foram realizados seis experimentos reunidos em quatro cenários neste ambiente. Com exceção dos experimentos realizados nos cenários V e VI, os demais mantiveram o dispositivo mestre em uma posição fixa e enquanto movimentava o escravo para as posições P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, mostradas na figura 4.8. O escravo era controlado por um *Laptop* Toshiba Intel Celerom de 1,6GHz, 20GB de HD e 256MB de memória RAM e o mestre controlado por um Pentium IV de 3GHz, 100G de HD e 1GB de memória RAM, ambos sobre a plataforma Fedora Core 3 e Linux kernel 2.6.11.

4.4.1 Cenário III - Regime Ativo

Este cenário foi planejado para realizar dois experimentos. O primeiro faz o envio de 60 pacotes de 4KB do nó Escravo em direção ao nó Mestre e o segundo inverte a situação e o Escravo se torna o destino das mensagens, de modo a verificar a influência no gasto de energia, do equipamento de comunicação sem fio ao assumir

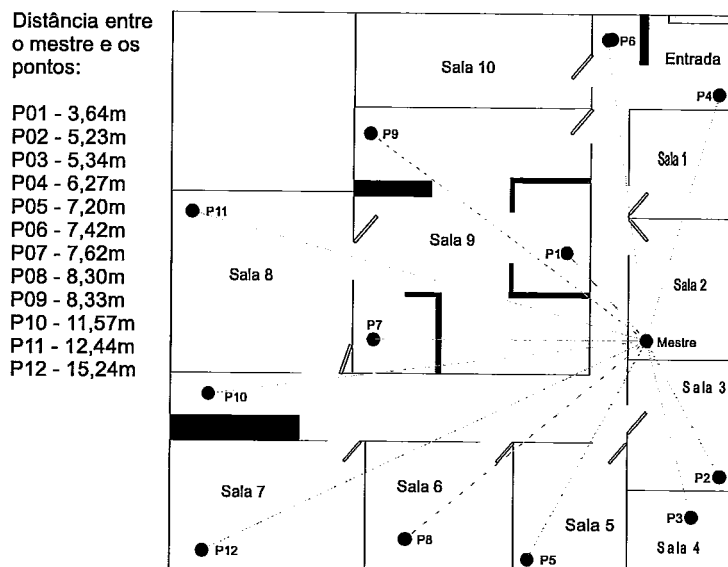


Figura 4.8: Mapa do LCP

o estado de fonte ou destino da mensagem, dentro de uma situação real de operação repleto de obstáculos.

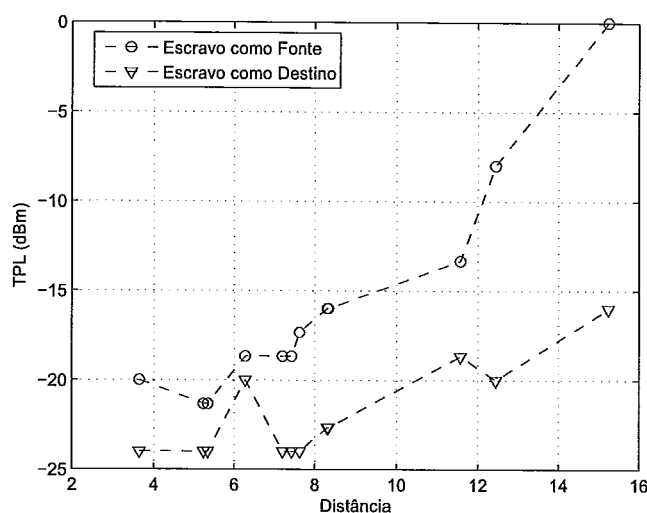


Figura 4.9: TPLs dos escravos Fonte e Destino

As figuras 4.9, 4.10 e 4.11 mostram que o comportamento do consumo dentro de ambientes com obstáculos, diminui a influência do nível de potência de transmissão sobre o gasto total de energia consumida e transfere parte deste peso para o tempo que o rádio precisa ficar ligado para completar a transmissão e recepção das

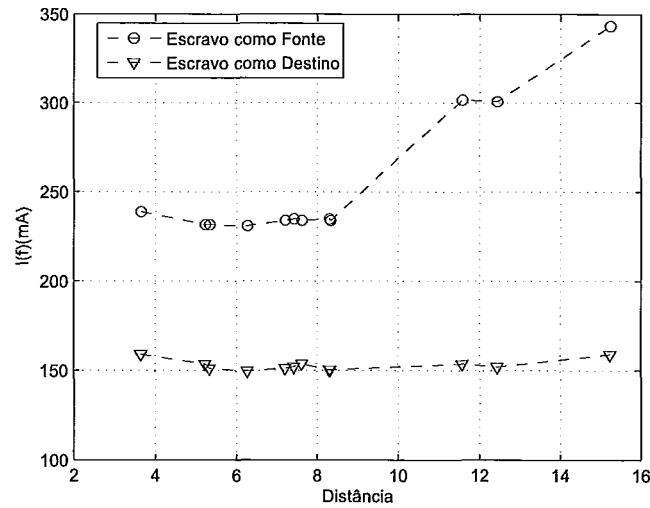


Figura 4.10: $I(f)$ dos escravos Fonte e Destino

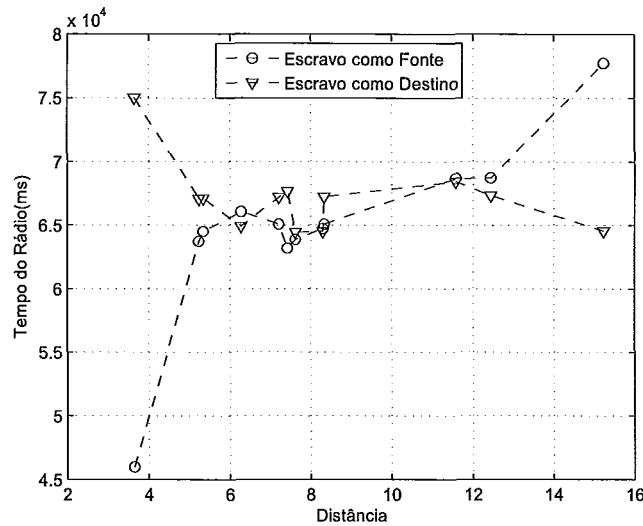


Figura 4.11: Tempo total que o Rádio ficou ligado em Tx e Rx do Escravo

mensagens. Em comparação com os gráficos anteriores de TPL, existe uma variação muito maior para pequenas distâncias, os obstáculos criam o efeito de afastamento entre mestre e escravo e faz com que o nível de energia de transmissão precise aumentar para atingir distâncias menores, além da observação de que o escravo na transmissão de pacotes precisou de um nível mais alto de potência para transmitir do que quando o mesmo escravo funcionava como receptor. Pois agora ele passou a ser o elemento passivo do controle de energia do Bluetooth e recebe mensagens o

obrigando a aumentar seu nível de energia de transmissão, seção 2.3.6.1.

4.4.2 Cenário IV - Regime Sniff e Hold

Para este cenário, após formar a piconet, foram realizados dois experimentos. No primeiro, o nó escravo é induzido através de comandos Bluetooth a entrar em regime de funcionamento *Sniff*, com intervalos de $t_{sniffattempt} = 2ms$ e $T_{sniff} = 50ms$. Durante as medidas o nó mestre permaneceu em regime ativo normal, recebendo as mensagens do escravo que funcionava em regime de baixo consumo.

O segundo experimento, utilizou os mesmos recursos que o primeiro, porém agora o escravo é induzido ao regime de baixo consumo do tipo *Hold*. Este regime permite apenas a atividade de varredura periódica dos outros canais disponíveis para outras conexões, cessando qualquer outra atividade no período de Hold, isto significa que o equipamento não disponibiliza informações referentes aos parâmetros de TPL, LQ e RSSI durante este intervalo. Logo a figura 4.12 mostra a curva de TPL para o regime de *Hold*, no instante de transição para o regime ativo. Enquanto o regime Sniff abre mão da qualidade de comunicação, permitindo um LQ e dRSSI menor, para adotar um nível de potência de transmissão (TPL) mais baixo.

A figura 4.13 mostra que o regime Hold apesar de cessar quase toda atividade durante seu período de funcionamento, pode não ser a opção mais econômica que o regime Sniff, quando é necessário fazer a transição deste regime para o modo ativo. O grande responsável por esta diferença é a potência de transmissão, controlada durante todo o regime Sniff e máxima para os intervalos de comunicação que intercalam o período de Hold.

A observação de que o tempo de rádio ligado ser maior no regime Hold que no Sniff, figura 4.14, se deve ao fato que as mensagens destinadas ao mestre durante o período de Hold ficavam armazenadas na memória do computador escravo para serem enviadas no instante em que o equipamento transitava para o regime ativo.

O regime Hold tem o potencial para se tornar um regime de funcionamento mais econômico que o Sniff, porém para isto acontecer ele precisa ser bem administrado na aplicação.

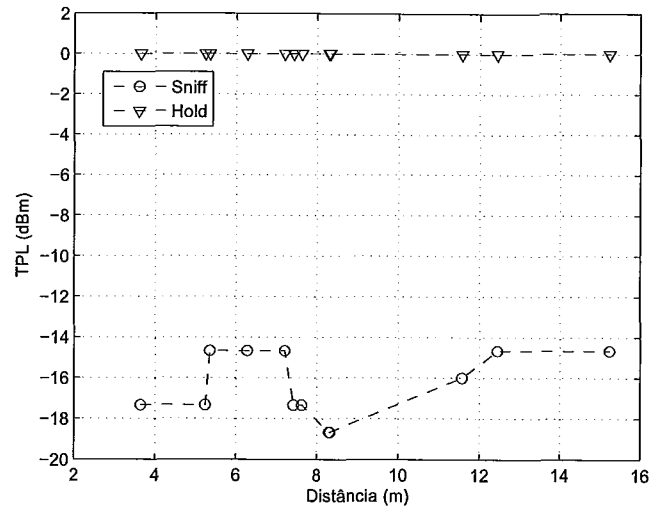


Figura 4.12: TPL dos escravos - Cenário IV

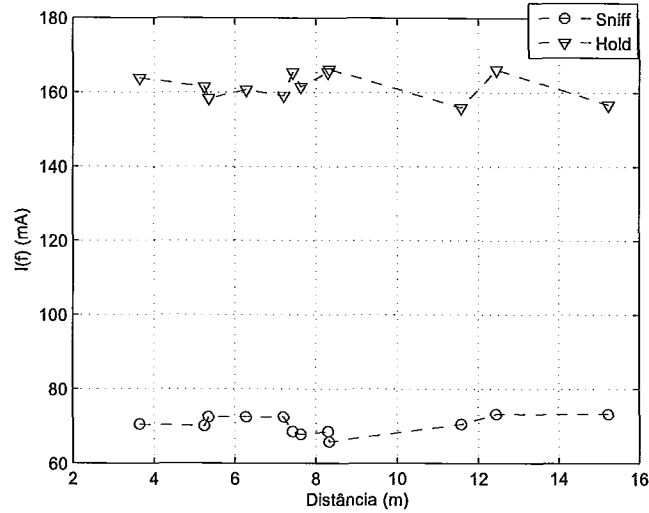


Figura 4.13: I(f) dos escravos - Cenário IV

4.5 Cenário V - Ping

Para observar as curvas características do equipamento de comunicação sem fio quanto a variação do tamanho do pacote, este experimento montou uma piconet dentro do LCP e sem variar a distância entre o nó mestre e o escravo, foram criadas mensagens de 100B até 30KB, sendo de 100B a 1KB usando passo de variação de tamanho igual a 100, de 1KB a 10KB passo de 1.000 e de 10KB a 30KB, passo de 10.000. Estas mensagens foram enviadas pelo escravo para o mestre, sem variar a

quantidade de mensagens, com um pequeno intervalo de 1 segundo entre mensagens.

Com os resultados medidos foram construídas as curvas a seguir:

A figura 4.15 mostra que não houve mudança do nível de potência de transmissão com a variação do tamanho da mensagem e que os dois nós usaram o mesmo nível de potência de transmissão durante o experimento, segundo o parâmetro TPL fornecido pelo Bluetooth.

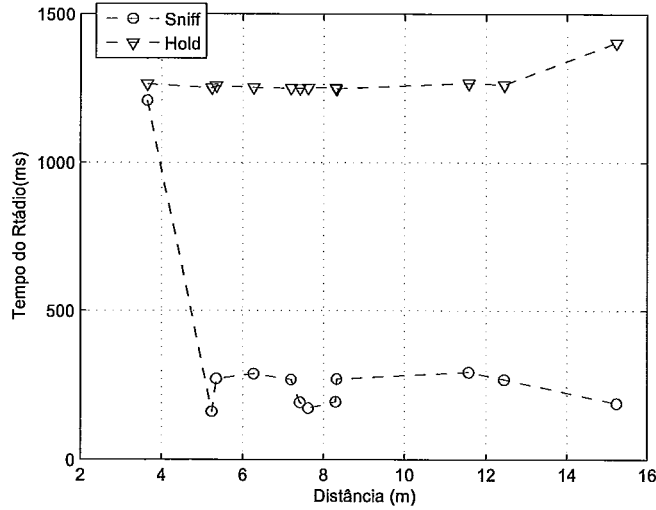


Figura 4.14: Tempo total que o Rádio ficou ligado em Tx e Rx do Escravo

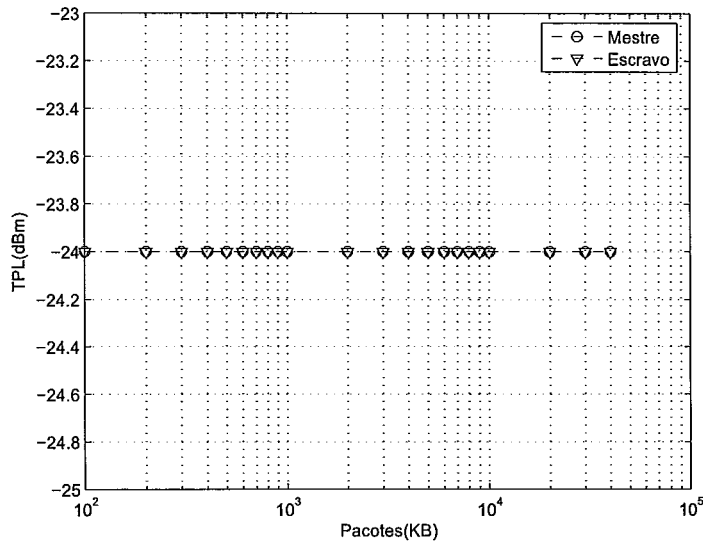


Figura 4.15: TPL - Cenário V

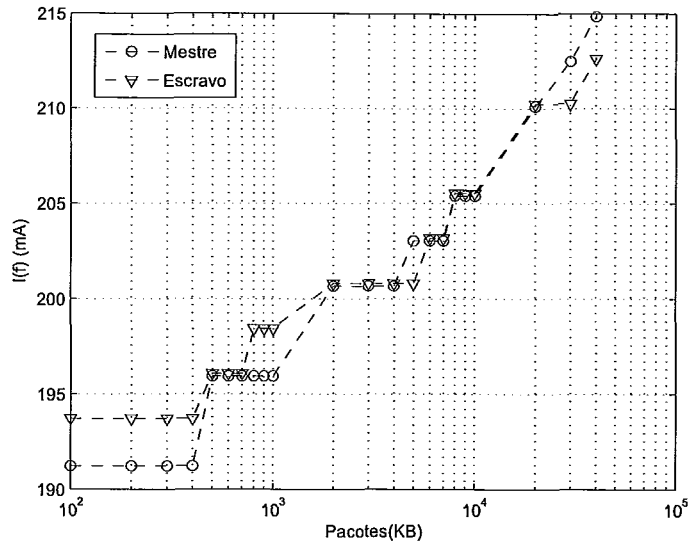


Figura 4.16: Mestre e Escravo - $I(f)$ - Cenário V

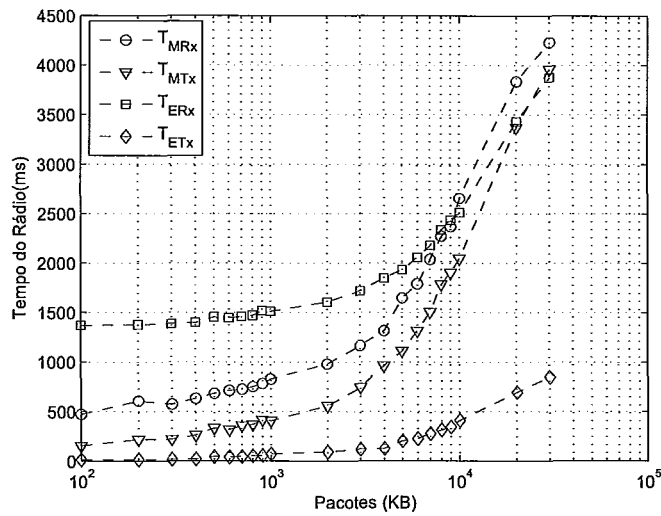


Figura 4.17: Mestre e Escravo - Tempo Tx e Rx - Cenário V

Na figura 4.16 notamos uma pequena variação da corrente consumida com o aumento do tamanho da mensagem e muito pouca variação entre o mestre e escravo. Isto mostra que o nível de energia de transmissão tem um peso grande no consumo, mas não é mandatório em algumas situações e aplicações do equipamento sem fio. Com o aumento do tamanho da mensagem, surge a necessidade de processar mais dados, por isso o consumo aumenta. Mas sem variação de distância, nem obstáculos na linha de visada dos equipamentos de transmissão, o valor de TPL não varia.

A figura 4.17 mostra o tempo total do rádio ligado em transmissão e recepção do mestre e escravo. Observa-se, que o escravo está gastando mais tempo para receber a mensagem de retorno e confirmação, do que o mestre gasta para retransmiti-la. Isto ocorre porque a contagem do tempo de rádio ligado em recepção, inclui o tempo que o mestre e escravo gastaram para verificar outros canais em busca de outros dispositivos. Porém com o aumento do tamanho da mensagem o escravo sacrifica as unidades de tempo utilizadas para verificar outros canais, para receber o restante da mensagem sem fragmenta-la.

4.6 Cenário VI - Mestre + 7 Escravos

Neste cenário foi observada a simples variação de consumo em relação ao aumento do número de conexões ativas com um único mestre, mostrado na figura 4.18. O experimento consistiu em ligar a UMDL em um dispositivo Bluetooth que irá servir de mestre e realizar uma conexão de cada vez com outro dispositivo Bluetooth no papel de escravo, até o número limite apontado pelo protocolo de sete escravos, ou seja formar uma piconet e acrescentar um escravo de cada vez até o limite de sete.

A figura 4.19, mostra um aumento quase linear do tempo total de rádio ligado deste mestre, com o acréscimo de escravos a piconet. Porém a figura 4.18 indica que esta variação de consumo não segue o mesmo comportamento, mas também é crescente com o número de escravos. Observando a figura 4.20, que retrata o nível de energia de transmissão em um único canal de comunicação mestre-escravo, de cada novo escravo adicionado durante o experimento é possível perceber que a variação do comportamento do consumo total de energia por parte do mestre não sofre uma forte influência do valor de TPL, pois para cada canal o mestre manteve um valor de TPL distinto.

4.7 Síntese dos Resultados

Com os resultados obtidos dentro de cada cenário para a variação de $I(f)$ e do tempo de rádio utilizado na comunicação é possível afirmar que estes parâmetros respondem a todos os principais fatores que influenciam o consumo de energia. Esses resultados contrastam com os do Bluetooth no sentido de que ele não mede a variação dos fatores tais como, o número de conexões, retransmissões ocorridas durante a troca de mensagens entre mestre e escravo e geografia do ambiente onde o equipamento

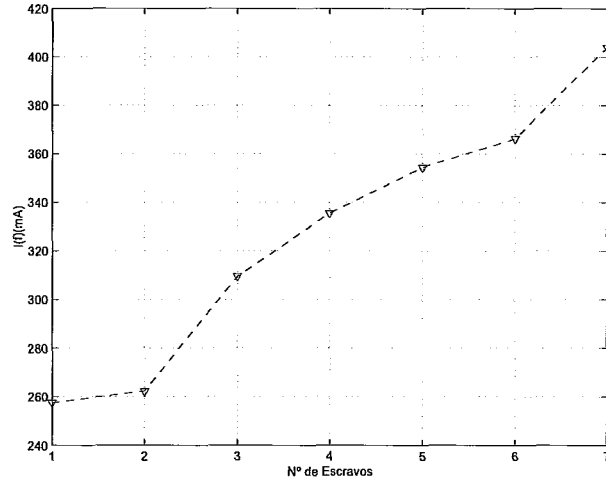


Figura 4.18: Mestre - $I(f)$ - Cenário VI

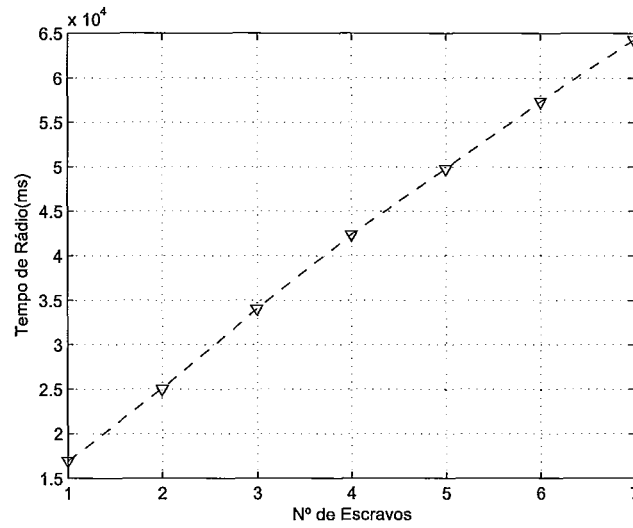


Figura 4.19: Mestre - Tempo - Cenário VI

está localizado.

Também foi possível comprovar algumas afirmações como a falta de simetria na energia de transmissão [11], primeiramente observada pela variação de TPL do mestre e escravo dentro do cenário II. Notamos também que a relação entre, a quantidade de chaveamentos no circuito RF para transmissão e recepção e o consumo de energia [22], foi melhor percebida no cenário IV. A variação do consumo com o tamanho da mensagem e o tempo de atividade do equipamento [20], foi demonstrada no cenário V.

A diferença no consumo observada em todos os cenários entre mestre e escravo

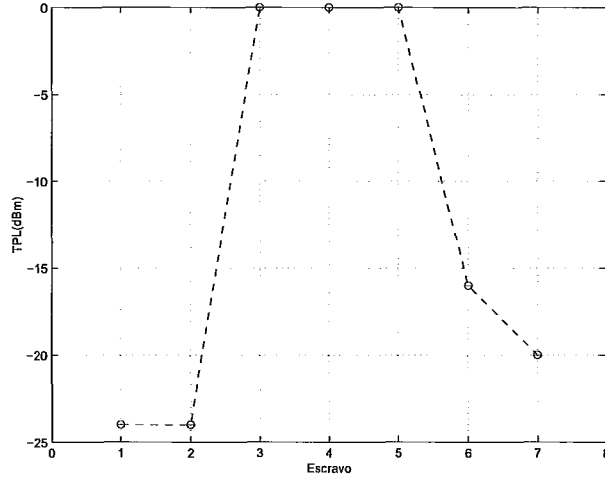


Figura 4.20: Mestre - TPL - Cenário VI

e seus regimes diferenciados de funcionamento, mostram o peso da influência que o ambiente de operação tem sobre a energia gasta pelos dispositivos de comunicação sem fio e a importância em diferenciar estes ambientes ao gerar simulações ou técnicas que tentam prever o comportamento do consumo de energia desses tipos de equipamentos. Observando os resultados da UMDC para gerar o parâmetro $I(f)$ da equação de consumo de energia, verificamos sua capacidade para demonstrar as mudanças de ambiente e geografia de operação dos equipamentos. Como resultado, a UMDC é capaz de caracterizar com precisão as curvas de consumo de energia destes diferentes ambientes e regimes de operação.

De fato, a equação 3.1 é um modelo simples capaz de indicar o consumo de energia com maior precisão, em comparação as demais técnicas descritas nesta dissertação.

Capítulo 5

Conclusões

Em um ambiente de rede descentralizado de comunicação sem fio, existem vários métodos para reduzir o consumo de energia pela otimização do roteamento e pela transmissão de dados entre outros. Porém, no desenvolvimento dessas soluções são utilizados simuladores de comunicação sem fio, pouco eficazes na avaliação do consumo de energia por não tratarem fenômenos ambientais como reflexão do sinal eletromagnético, geografia do local de operação e diversas outras características inerentes ao equipamento de comunicação sem fio e aos protocolos de comunicação, gerando variações no gasto de energia desses equipamentos.

Com o objetivo de conhecer o comportamento do consumo de energia dos equipamentos de comunicação sem fio e diferenciar o consumo de transmissão e de recepção para obter informações mais realistas do que os ambientes simulados são capazes de fornecer, no presente estudo foi contruída uma Unidade de Medida Direta de Consumo (UMDC) de energia e um modelo próprio para interpretação das informações fornecidas pela UMDC. A UMDC fornece para o modelo de consumo a função que descreve o comportamento do gasto de energia do equipamento de comunicação sem fio em qualquer ambiente de operação e sob qualquer protocolo de comunicação.

Para avaliar a eficiência desse sistema de medida e caracterizar a curva de consumo de energia nas principais situações de operação foram realizados diversos experimentos em situações reais utilizando o Bluetooth como protocolo de comunicação sem fio. Os experimentos foram divididos em ambientes sem obstáculos e com obstáculos. Dentro desses ambientes foram realizados experimentos variando a distância entre os nós mestre e escravo, o regime de funcionamento (*Ativo*, *Sniff* e *Hold*), o tamanho das mensagens transmitidas, o número de conexões e o nó fonte das mensagens.

Os resultados mostraram uma grande variação no comportamento do consumo de energia entre o ambiente com obstáculos e sem obstáculos. Os cenários com obstáculos sofrem um efeito de distanciamento entre os nós, aumentando o consumo para pequenas distâncias. Os testes com os regimes de baixo consumo de energia indicaram uma economia também na potência de transmissão, além da economia no tempo em que o circuito de transmissão e recepção (tempo de rádio) fica ligado. As variações no tamanho da mensagem mostraram uma grande variação no tempo de rádio ligado e nenhuma mudança no nível de corrente consumida por aumento no tamanho da mensagem. O aumento do número de conexões com o mestre provocou um aumento da corrente consumida e do tempo de rádio ligado. Com o nível de potência usado na transmissão diferente para cada escravo adicionado, ficou clara a necessidade de distinguir a avaliação do consumo por unidade escrava.

Esses resultados demonstram a capacidade da UMDC de perceber a variação do consumo de energia em diversos tipos de situação e em especial, a importância de avaliar separadamente o consumo do mestre e escravo, a necessidade de avaliar o tempo que o rádio permaneceu ligado para transmissão e recepção e a influência do ambiente de operação no consumo dos equipamentos de comunicação sem fio.

O principal elemento no sistema proposto para medição de consumo de energia em equipamentos sem fio, é a definição da curva de corrente, $I(f)$, que deve ser fornecida pelo dispositivo de conversão UMDC. Apesar desse dispositivo ser o ponto forte do modelo de consumo, ele precisa sofrer modificações e calibrações para cada tipo de dispositivo de comunicação sem fio ao qual for conectado. Por esse motivo, algumas melhorias são sugeridas como trabalhos futuros para que a UMDC se torne mais genérica.

A principal melhoria é a criação de um sistema de auto-calibração conectado a tensões de referência externas e procedente do equipamento de comunicação sem fio. Sua precisão pode ser melhorada com a implementação da comunicação USB, como interface de comunicação com o computador de controle da UMDC. Também o microcontrolador utilizado na UMDC pode ser substituído por outro com maior resolução na conversão analógica-digital.

A UMDC poderia também sofrer modificações para que possa ser utilizada em experimentos com maior quantidade de nós. Para isso é necessário um sistema integrado com um relógio de tempo real. Este sistema permitirá seu emprego em todos os nós de um experimento em uma rede local, possibilitando, assim, uma

avaliação precisa do consumo de energia de dezenas ou centenas de nós.

Estudos futuros irão realizar uma comparação quantitativa com um simulador de rede sem fio e uma integração do sistema de medida com esse simulador, por exemplo *Blueware*. Além disso, o sistema UMDC e o modelo de consumo também podem ser utilizados para avaliar empiricamente as métricas TB/TU, propostas recentemente com o objetivo de auxiliar o controle de potência de transmissão em cenários com obstáculos [12].

Referências Bibliográficas

- [1] “Projeto de pesquisa VINT com colaboração USC/ISI, Xerox, PARC, LBNL e UC Berkeley. Network Simulator - NS2 ”, 2006.
- [2] Bluetooth® SIG, Inc. “<https://www.bluetooth.org/spec/>”.
- [3] Bluetooth® SIG, Inc. “Specification of the Bluetooth System”, 2002.
- [4] Callaway, E. H. *Wireless Sensor Networks Architectures and Protocols*. Auerbach, 2004.
- [5] Cano, J.C., Manzoni, P. “A Performance Comparison of Energy Consumption for Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols”. In: *MASCOTS '00: Proceedings of the 8th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, pp. 57, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [6] Desoer, C. A., Kuh, E. S. *Teoria Básica de Circuitos*. Guanabara Dois, 1979.
- [7] Dutra, R. C. *Um Estudo de Redes de Sensores Anônimos*. Master’s thesis, Universidade Federal do Rio Janeiro, 2005.
- [8] Forman, G. H., Zahorjan, J. *The Challenges of Mobile Computing*. Technical Report TR-93-11-03, Univercidade de Washington, Abril 1994.
- [9] Friis, H. T. *A note on a simple transmission formula*. *Proc. IRE*, pp 34, 1946. Technical report, 1946.
- [10] Haartsen, J. C., B.V, Ericsson Radio System. “The Bluetooth Radio System”. *IEEE*, Fevereiro 2000.
- [11] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks”. In: *HICSS '00*:

Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 8, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.

- [12] Kostin, S., Amorim, C. L. *Métricas para Controle Eficiente de Potência de Transmissão em Cenários de Redes de Sensores com Obstáculos*. Technical Report ES-692/06, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [13] Margi, C. B., Obraczka, K. “Instrumenting Network Simulators for Evaluating Energy Consumption in Power-Aware Ad-Hoc Network Protocols”. In: *MASCOTS '04: Proceedings of the The IEEE Computer Society's 12th Annual International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS'04)*, pp. 337–346, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [14] Min, R., Chandrakasan, A. “Top Five Myths about the Energy Consumption of Wireless Communication”, 2001.
- [15] Morrow, Robert. *Bluetooth Operation and Use*. McGraw-Hill TELECOM, 2002.
- [16] Negri, L., M.Sami, Tran, Q. D., Zanetti, D. “Flexible Power Modeling for Wireless Systems: Power Modeling and Optimization of two Bluetooth Implementations.”. In: *WOWMOM*, pp. 408–416, 2005.
- [17] Negri, L., Thiele, L. “Power Management for Bluetooth Sensor Networks”. *Wireless Sensor Network European Workshop*, Fevereiro 2006.
- [18] QualNet, SCT. “<http://www.scalable-networks.com/>”.
- [19] Raimo, Jeff. *Comparing three popular wireless standards*. Technical report, Siemens Building Technologies, Inc., 2006.
- [20] Rácz, A., Miklós, G., Kubinszky, F., Valkó, A. “A Pseudo Random Coordinated Scheduling Algorithm For Bluetooth Scatternets”. In: *MobiHoc '01: Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pp. 193–203, New York, NY, USA, 2001. ACM Press.
- [21] Santi, Paolo. *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. JohnWiley & Sons Ltda., 2005.

- [22] Tseng, Y., Lin, T. "Power-conservative designs in ad hoc wireless networks". pp. 71–81, 2003.
- [23] Xiang, L., Xiaozong, Y. "A Sniff Scheduling Policy for Power Saving in Bluetooth Piconet". In: *ICPADS '05: Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS'05)*, pp. 217–222, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [24] Zhu, H., Cao, G., Kesidis, G., Das, C. "An Adaptive Power Conserving Service Discipline for Bluetooth", 2002.