

**ODAIR PERIANÊZ FERLINE**

**INTERCONEXÃO DE REDES BLUETOOTH**  
**Uma Aplicação em Telemetria de Serviços de**  
**Distribuição de Energia**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática Aplicada.

**CURITIBA**

**2003**



**ODAIR PERIANÊZ FERLINE**

**INTERCONEXÃO DE REDES BLUETOOTH**  
**Uma Aplicação em Telemetria de Serviços de**  
**Distribuição de Energia**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática Aplicada.

Área de Concentração: *Metodologias e Técnicas de Computação*

Orientador: Prof. Dr. Marcelo E. Pellenz

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz A. de Paula Lima Jr.

**CURITIBA**

**2003**

Ferline, Odair Perianêz

INTERCONEXÃO DE REDES BLUETOOTH Uma Aplicação em Telemetria de Serviços de Distribuição de Energia. Curitiba, abril/2003. 172p.

Dissertação – Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada.

1. Bluetooth 2. *Wireless Communication* 3. Telemetria 4. *Scatternets*.  
I. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada II-t

Esta página deve ser reservada à ata de defesa e termo de aprovação que serão fornecidos pela secretaria após a defesa da dissertação e efetuadas as correções solicitadas.



À minha esposa Silvana,  
e aos meus filhos,  
Juliana e Guilherme.



## Agradecimentos

À minha família, pelo estímulo e incansável compreensão durante todo o período em que me dediquei à realização deste trabalho.

Ao professor e orientador Dr. Luiz Augusto de Paula Lima Jr. pela orientação segura e pelas sugestões e críticas apresentadas ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Em especial, ao amigo e cunhado, engenheiro Mauro Ricardo Brás Loureiro, pelas importantes contribuições e constante apoio, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço também a CAPES e a PUCPR pelo apoio financeiro, e finalmente, aos colegas, amigos, demais professores e todos aqueles que de alguma forma colaboraram para que este trabalho pudesse ser realizado.



# Sumário

<b>Agradecimentos</b>	vii
<b>Sumário</b>	ix
<b>Lista de Figuras</b>	xiii
<b>Lista de Tabelas</b>	xv
<b>Lista de Símbolos</b>	xvi
<b>Lista de Abreviaturas</b>	xvii
<b>Resumo</b>	xxi
<b>Abstract</b>	xxiii
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação.....	1
1.2. Desafio.....	9
1.3. Proposta.....	10
1.4. Contexto Tecnológico.....	12
1.5. Contribuição.....	15
1.6. Organização.....	15
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Fundamentos da Tecnologia Bluetooth</b>	<b>17</b>
2.1. Introdução.....	17
2.2. A Especificação Principal Bluetooth.....	19
2.2.1. Arquitetura Bluetooth.....	19
2.2.2. A Pilha de Protocolos.....	24

2.2.3. Estabelecendo uma Conexão de Rede.....	29
2.2.4. Recursos de Segurança.....	35
2.3. Os Modelos de Uso e Perfis.....	39
2.4. Compreendendo e Organizando os Perfis.....	41
2.4.1. Perfis Genéricos.....	42
2.4.2. Os Perfis de Telefonia.....	47
2.4.3. Perfis de Rede.....	50
2.4.4. Os Perfis de Troca de Objetos.....	53
2.5. Tecnologias Concorrentes e Complementares.....	55
2.6. Tecnologia Bluetooth no Futuro.....	60
2.7. Conclusão.....	63

### Capítulo 3

<b>Interconexão de Redes Bluetooth</b> .....	<b>65</b>
3.1. Redes Bluetooth.....	65
3.1.1. Bluetooth MAC.....	66
3.1.2. Capacidade de uma <i>Piconet</i> .....	67
3.1.3. <i>Intra-Piconet Scheduling</i> .....	69
3.2. <i>Scatternet</i> – Interconexão de Redes Bluetooth.....	72
3.2.1. <i>Inter-Piconet Scheduling</i> .....	76
3.2.2. Formação de <i>Scatternet</i> .....	80
3.3.3. Roteamento em <i>Scatternet</i> .....	83
3.3. Conclusão.....	85

### Capítulo 4

<b>Usando <i>Scatternets</i> em Ampla Área Geográfica</b> .....	<b>87</b>
4.1. O Sistema de Telemetria Adotado como Referência .....	87
4.2. A Rede de Comunicação para Suporte ao Sistema de Telemetria.....	92
4.3. Topologia e Roteamento na Rede Bluetooth.....	96
4.3.1. Topologia e Estrutura.....	96
4.3.2. Roteamento de Mensagens.....	101
4.3.3. Serviço de Rede Bluetooth.....	107

4.4. Volume de Dados e Capacidade da Rede Bluetooth.....	110
4.5. Conclusão.....	122
<b>Capítulo 5</b>	
<b>Conclusão</b>	<b>125</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>129</b>
<b>Apêndice A</b>	
<b>Planilhas do Modelo de Simulação</b>	<b>133</b>
A.1. Cálculo da Taxa de Chegada de Dados .....	133
A.2. Estimativa de Tempo de Retardo Acumulado na Rede .....	134



## Lista de Figuras

Figura 2.1	Arquitetura de um dispositivo Bluetooth .....	19
Figura 2.2	Salto de frequência por divisão de tempo.....	22
Figura 2.3	A pilha de Protocolos Bluetooth .....	25
Figura 2.4	Exemplo de uma <i>piconet</i> .....	31
Figura 2.5	Duas <i>piconets</i> formando uma <i>scatternet</i> .....	33
Figura 2.6	A segurança de controle de chave entre dois dispositivos.....	38
Figura 2.7	Família de Perfis Bluetooth.....	42
Figura 2.8	A pilha de protocolos para o Perfil de Acesso Genérico.....	44
Figura 2.9	Pilhas de protocolo local e remoto para o perfil <i>SDAP</i> .....	45
Figura 2.10	As pilhas de protocolos do Perfil de Porta Serial .....	46
Figura 2.11	A pilha de protocolos do Perfil de Troca Genérica de Objeto..... Intercom.....	47
Figura 2.13	Pilha de protocolos para o Perfil <i>Headset</i> .....	50
Figura 2.14	A pilha de protocolos do Perfil de Acesso a LAN .....	51
Figura 2.15	A pilha de protocolos para o Perfil de Acesso Discado à Rede .....	52
Figura 2.16	A pilha de protocolos para o Perfil de Transferência de Arquivo.....	53
Figura 2.17	A pilha de protocolos para o Perfil de Sincronização.....	54
Figura 2.18	A pilha de protocolos para o Perfil de Envio de Objetos.....	55
Figura 3.1	Atraso médio ( <i>em slots</i> ) de diferentes algoritmos numa <i>piconet</i> com 7 <i>slaves</i> , considerando somente tráfego entre <i>master</i> e <i>slaves</i> . [HAR02]...	70
Figura 3.2	Atraso médio ( <i>em slots</i> ) de diferentes algoritmos numa <i>piconet</i> composta por 7 <i>slaves</i> , considerando tráfego entre <i>slaves</i> , com o <i>master</i> servindo de ligação. [HAR02] .....	71
Figura 3.3	Exemplo de uso de uma <i>scatternet</i> no contexto de uma PAN [JOH01a]	72
Figura 3.4	Uso de <i>scatternet</i> para melhorar o desempenho de uma rede Bluetooth	

	[JOH01a] .....	73
Figura 3.5	Uma <i>scatternet</i> formada por três <i>piconets</i> [BAA02].....	74
Figura 3.6	Uma <i>scatternet</i> com um dispositivo de interligação ( <i>bridge</i> ) que divide seu tempo entre as duas <i>piconets</i> [JOH02] .....	77
Figura 4.1	Dispositivos ao longo da linha de postes de energia formando uma <i>scatternet</i> .....	93
Figura 4.2	Arquitetura da rede mostrando segmentos de rede Bluetooth conectados num concentrador/ <i>gateway</i> para uma rede IP em segundo plano .....	94
Figura 4.3	Estrutura da rede Bluetooth cobrindo algumas quadras .....	98
Figura 4.4	Árvore correspondente a uma rede Bluetooth de uma área .....	99
Figura 4.5	Estrutura básica de um quadro para roteamento na rede Bluetooth .....	103
Figura 4.6	Arquitetura do serviço de rede Bluetooth (SRBT) .....	107
Figura 4.7	Esquema de uso do serviço de rede Bluetooth (SRBT) .....	109
Figura 4.8	Gráfico de taxa de chegada de dados ao concentrador.....	114
Figura 4.9	Configuração típica de uma área com um concentrador e 4 segmentos.	115
Figura 4.10	Evolução da estimativa de tempo de retardo acumulado no segmento...	117
Figura 4.11	Volume de medidores e estimativa de tempo de retardo acumulado.....	118

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Potência de saída para cada classe de potência Bluetooth [MIL01] .....	21
Tabela 2.2	Suporte a Canais de Comunicação Bluetooth [HEL01] .....	23
Tabela 2.3	Protocolos e camadas na pilha de protocolos Bluetooth [HEL01].....	26
Tabela 2.4	Comparação entre tecnologias sem fio [MIL01] .....	57
Tabela 3.1	Taxas máximas de transmissão de dados .....	67
Tabela 4.1	Taxa de chegada de dados ao concentrador .....	113
Tabela 4.2	Estimativa de tempo de retardo acumulado para um segmento típico .....	119
Tabela 4.3	Estimativa de tempo de retardo acumulado para uma área típica .....	120
Tabela A.1a	Simulação de tempo de retardo acumulado num ramo secundário .....	136
Tabela A.1b	Simulação de tempo de retardo acumulado num segmento típico .....	137

## Lista de Símbolos

$Mc$	quantidade de medidores por concentrador
$Fc$	freqüência de coleta de registros de medição
$t$	período de tempo em que é feita a coleta de registros de medição
$Ic$	intervalo de coleta (em minutos)
$k/j/d$	referência a um nó da rede Bluetooth
$ta$	tempo de amostragem
$Rm$	tamanho em bytes do registro de medição
$M$	média de medidores atendidos por nó da rede
$tmd$	taxa máxima de dados em kbits/s
$Vl$	volume de dados local de um nó (em bits)
$tg$	tempo de gerenciamento de tarefas diversas (em <i>slots</i> ) – tx serial
$tgp$	tempo de gerenciamento de tarefas diversas - tx paralela
$Ps$	probabilidade de sucesso na sincronização de <i>slave</i>
$Tw$	tempo de janela de sincronização de <i>slave</i> em cada <i>piconet</i> – tx serial
$twp$	tempo de janela de sincronização de <i>slave</i> em cada <i>piconet</i> – tx paralela
$qNRS$	quantidade de nós no ramo secundário
$QRs$	quantidade de ramos secundários por raiz secundária
$M$	média de medidores atendidos por nó da rede

## Lista de Abreviaturas

ABRACE	Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia
ACL	<i>Asynchronous Connectionless</i>
AM_ADDR	<i>Active Member Address</i>
AMR	<i>Automatic Meter Reading</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AR_ADDR	<i>Access Request Address</i>
ARQ	<i>Automatic Retransmission Query</i>
AVRCP	<i>Audio/Video Remote Control Profile</i>
BD_ADDR	<i>Bluetooth Device Address</i>
BIP	<i>Basic Imaging Profile</i>
BNEP	<i>Bluetooth Network Encapsulation Protocol</i>
BPP	<i>Basic Printing Profile</i>
CIP	<i>Common ISDN Access Profile</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CTP	<i>Cordless Telephony Profile</i>
DAS	<i>Distribution Automatic System</i>
DECT	<i>Digital Enhanced Cordless Telephone</i>
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
DUNP	<i>Dial-up Networking Profile</i>
End_Nete_BT	Endereço de Rede Bluetooth
Eq_Id	Identificação do Equipamento
ESDP	<i>Extended Service Discovery Profile</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>

FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FINEP	Financiadora Nacional de Estudos e Pesquisas
FP	<i>File Transfer Profile</i>
GAP	<i>Generic Access Profile</i>
GAVDP	<i>Generic Audio/Visual Distribution Profile</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
GOEP	<i>Generic Object Exchange Profile</i>
GPRS	<i>General Packed Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HCI	<i>Host Controller Interface</i>
HCPR	<i>Hardcopy Cable Replacement Profile</i>
HFP	<i>Hands-Free Profile</i>
HID	<i>Human Interface Device Profile</i>
HSP	<i>Headset Profile</i>
HTTP	<i>Hypertext Transmission Protocol</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IntP	<i>Intercom Profile</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPS	<i>Inter-Piconet Scheduling</i>
IPX	<i>Internet Packed Exchange</i>
IrDA	<i>Infrared Data Association</i>
IrMC	<i>Ir MÓbile Communications</i>
IrOBEX	<i>Infrared Object Exchange</i>
IRPS	<i>Intra-Piconet Scheduling</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
L2CAP	<i>Logical Link and Control Adaptation Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LAP	<i>LAN Access Profile</i>
LMP	<i>Link Manager Protocol</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
OBEX	<i>Object Exchange Protocol</i>

OPP	<i>Object Push Profile</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PAN	<i>Public Area Network Profile</i>
PCM	<i>Pulse Modulation Code</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
PIN	<i>Personal Information Number</i>
PLC	<i>Power Line Carrier</i>
PM_ADDR	<i>Parked Member Address</i>
PPP	<i>Point-to-Point Protocol</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFCOMM	<i>Radio Frequency Communications Protocol</i>
RP	<i>Rendezvous Point</i>
SCO	<i>Synchronous Connection-Oriented</i>
SDAP	<i>Service Discovery Application Profile</i>
SDP	<i>Service Discovery Protocol</i>
SIG	<i>Special Interest Group</i>
SP	<i>Synchronization Profile</i>
SPP	<i>Serial Port Profile</i>
SRBT	<i>Serviço de Rede Bluetooth</i>
TCP	<i>Transport Control Protocol</i>
TCS-BIN	<i>Telephony Control Specification – Binary</i>
UWB	<i>Ultra-Wideband Radio</i>
VDP	<i>Video Distribution Profile</i>
WAP	<i>Wireless Application Protocol</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>



## Resumo

As companhias de distribuição de energia elétrica no Brasil vêm enfrentando grandes desafios. Atropeladas pela crise de energia pela qual o país passou recentemente e pelas novas regras de atuação decorrentes do processo de privatização, elas estão atualmente, mais do que em qualquer outra época, sendo impelidas a buscar novos meios para otimizar sua operação e maximizar a qualidade de serviços, como condição para garantir sua rentabilidade e sobrevivência num mercado crítico, que envolve um serviço absolutamente essencial para toda sociedade moderna.

Desse modo, toma cada vez mais importância para essas companhias a possibilidade de poderem contar com ferramentas automatizadas e informações detalhadas sobre o perfil de seus clientes, como forma de alcançar desempenho mais eficaz. Nesse contexto, o uso de um sistema de telemetria de serviços de distribuição de energia elétrica passa a ser um fator chave para a obtenção de maior eficácia operacional. Por sua vez, um sistema de telemetria dessa natureza depende da disponibilidade de uma rede de comunicação de dados de grande abrangência geográfica e alta capilaridade, tal como a própria rede de distribuição de energia. Adicionalmente essa rede de comunicação deve ser de baixo custo e fácil manutenção. Esses requisitos caracterizam um desafio que ainda precisa ser superado, não somente pelo setor elétrico brasileiro, mas pela maior parte das companhias de distribuição de energia do mundo.

A tecnologia Bluetooth é uma solução de comunicação *wireless* de curta distância orientada principalmente para aplicações de Rede Pessoal (*PAN, Personal Area Network*). É uma tecnologia recente (julho/1999), mas bastante promissora como solução de conectividade para dispositivos eletrônicos pessoais, especialmente pelo grande crescimento do uso de dispositivos móveis. A especificação Bluetooth contempla diversos modelos de uso da tecnologia. O cenário primário prevê o uso de Bluetooth para substituir cabos de interconexão entre dispositivos pessoais, tais como notebooks, telefones celulares, PDAs, câmeras digitais, e similares. Outros cenários incluem o uso da tecnologia Bluetooth para permitir a conexão de dispositivos pessoais a pontos de acesso de redes locais (*LAN, Local Área Network*), para

acessar serviços remotos através da conexão via um telefone celular, e para a conexão ad hoc entre dispositivos pessoais [BIS01].

Neste trabalho aborda-se um novo cenário para aplicação da tecnologia Bluetooth. A proposta é usar a tecnologia Bluetooth para a construção de uma rede de comunicação de dados *wireless* que deverá dar suporte a um sistema de telemetria de serviços de distribuição de energia elétrica em zonas urbanas. Trata-se, portanto, de uma rede de grande abrangência geográfica, baseada na interconexão de redes Bluetooth (*scatternets*). O sistema de telemetria proposto foi usado como modelo de referência para o estudo, mas ao final do trabalho obteve-se não somente uma nova alternativa de solução de rede de comunicação para esse caso em particular, mas também elementos potencialmente aplicáveis a outros projetos de rede *wireless* envolvendo dispositivos dispersos em grandes áreas geográficas, como por exemplo, sensores de segurança, sismógrafos, monitoração ambiental, medidores de gás, e assim por diante.

**Palavras-Chave:** Bluetooth, *Wireless Communications*, Telemetria, *Scatternets*.

## Abstract

The electric energy distribution companies are facing great challenges, especially in Brazil. Run over by the crisis of energy by which the country has recently gone through and because of the new current rules of acting resulting from the privatization process, they are now, more than ever, being impelled to look for new ways to optimize their operation and maximize the service quality, as a condition to guarantee its profitability and survival in a critical market involving an absolutely essential service for any modern society. Therefore, the possibility of counting on automated tools and detailed information about their customer's profile is becoming more and more important for those companies, as a form to achieve a more effective acting. In that context, the use of a telemetry system of electric energy distribution services becomes a key factor to obtain a greater operational effectiveness. However, a telemetry system of that nature depends on the availability of a data communication network as wide as the energy distribution network and with the same capillarity. Additionally, that communication network should be cheap and easy to maintain. Those requirements characterize a challenge that still needs to be overcome, not only for the Brazilian electric sector, but also for most of the energy distribution companies around the world.

The wireless technology Bluetooth is a short-range communication solution oriented for PAN (Personal Area Network) applications. The technology is quite recent (July/1999) and promising as a connectivity solution for personal electronic devices, especially due to the growth of the use of mobile devices. The Bluetooth specification defines several models of use of the technology. The primary scenario foresees the use of Bluetooth to substitute interconnection cables among personal devices, such as notebooks, cellular telephones, PDAs, digital cameras. Other scenarios include the use of the Bluetooth technology to allow the connection of personal devices with access points of Local Area Network (LAN), to use remote services through a cellular telephone connection, and to make ad hoc connections among personal devices [BIS01].

This work considers a new scenario for applying the Bluetooth technology. The proposal is focused on the use of the Bluetooth technology for constructing a wireless data communication network that should give support to a telemetry system for electric energy distribution services in urban zones. Therefore, it is a question of a network covering a wide geographic area based on the interconnection of Bluetooth networks (*scatternets*). The telemetry system proposed was used as a reference model for study purposes, and at the end of the work it was obtained not only a new alternative solution for a communication network for that case in particular, but also some elements that are potentially applicable to other short-range wireless network projects involving devices spread over large geographical areas, like for instance, safety sensors, seismographs, environmental monitoring, gas meters, and so on.

**Keywords:** Bluetooth, Wireless Communications, Telemetry, *Scatternets*.

# Capítulo 1

## Introdução

A tecnologia Bluetooth<sup>1</sup> é bastante promissora como solução de comunicação sem fio para curta distância. Entretanto, apesar do aparente paradoxo, existe uma oportunidade para se aplicar essa tecnologia também na construção de redes de comunicação de dados de cobertura geográfica mais ampla, que poderiam dar suporte para sistemas de telemetria em distribuição de energia elétrica, incluindo leitura automática de medidores (*AMR – Automated Meter Reading*), assim como outras aplicações envolvendo dispositivos eletrônicos dispersos. Neste documento considera-se o uso de redes Bluetooth (*scatternets*) para interligar e controlar milhares de medidores de energia elétrica em regiões urbanas.

Nos tópicos a seguir, deste capítulo, apresentam-se as principais motivações e desafios relativos a esta proposta, bem como as contribuições alcançadas com o desenvolvimento deste trabalho, que são aplicáveis não só no cenário de referência mas também em outros cenários de uso que têm por base o mesmo contexto tecnológico.

### 1.1. Motivação

O recente período de dificuldades com relação à disponibilidade de energia elétrica pelo qual passou o Brasil certamente trouxe muitas lições. Talvez a mais importante tenha sido a tomada de consciência de que energia elétrica, além de ser fundamental no mundo de hoje, é também um bem escasso e caro. Por consequência uma sociedade que se preze não pode se dar ao luxo de desperdiçar energia elétrica, sob pena de estar contratando o seu

---

<sup>1</sup> Ver a seção “1.4. Contexto Tecnológico” neste capítulo.

próprio colapso futuro, pois a dependência de energia elétrica no mundo atual é tão profunda que se torna impensável que o homem seria capaz de viver sem ela.

Observou-se também que a crise de energia só não teve proporções ainda mais sérias porque a partir do momento em que a sociedade brasileira tomou conhecimento do problema, houve um engajamento de toda a população no esforço de racionamento de consumo de energia. De um momento para outro a grande maioria passou a procurar conhecer seus dados de consumo e a buscar formas de diminuir os gastos com energia elétrica, para evitar as multas anunciadas e as medidas de racionamento (os “apagões”) planejadas na tentativa de se impedir o caos para o país. Por certo, os resultados a que se chegaram hoje mostram que, além do bom nível de chuvas, a população brasileira desempenhou um papel fundamental no processo, ao monitorar o seu consumo de energia elétrica visando a sua redução.

Esse processo todo nos mostra ainda uma outra lição. Na verdade, ele demonstra a importância da disponibilidade de informações para se fazer um adequado gerenciamento de recursos, seja ao nível do consumidor, das empresas ou mesmo do país como um todo.

Quando se reexamina a recente crise de energia sob a perspectiva da disponibilidade de informações fundamentais, que nesse caso poderia ser representada pelo perfil diário de consumo de energia elétrica de cada consumidor, observa-se que foi notória a dificuldade enfrentada pela maioria da população. Alguns até procuraram aprender a ler aqueles antigos medidores de energia elétrica, ainda usados na maioria das residências e a conhecer quais eram os equipamentos e os costumes que geram maior consumo dentro de cada família. Entretanto, a pouca praticidade para monitorar o medidor era tanta que o que acabou prevalecendo foi o uso da própria fatura mensal, emitida pela companhia distribuidora de energia. Certamente essa situação acabou dificultando e atrasando a descoberta das medidas mais eficazes e das que não surtiam efeito de redução significativo (mas que eventualmente eram até mais importantes para a rotina da família), já que a avaliação de resultados, que poderia indicar a necessidade de novos ajustes, tinha um ciclo mensal.

Por outro lado, imagine-se que, em plena fase de reação à crise, cada consumidor tivesse sempre ao seu alcance, de maneira extremamente fácil e simples, um perfil diário atualizado do seu consumo de energia elétrica. Certamente o processo teria sido ainda mais eficaz, com resultados sendo alcançados muito mais rapidamente, em decorrência do rápido ciclo entre tomar medidas e avaliar os resultados. Ou seja, a maior disponibilidade de informação teria tido o efeito de agilizar a descoberta das medidas de economia mais

apropriadas à situação de cada consumidor, com benefícios para ele próprio e também para o país.

Se essa questão for examinada pela perspectiva das companhias de distribuição de energia elétrica, pode-se observar que também para elas essas informações seriam importantes. Não somente pelo aspecto de melhor atender a seus clientes, mas principalmente porque a pronta disponibilidade do registro detalhado de consumo de energia elétrica de cada consumidor, atualizado a curtos intervalos de tempo (10' a 15' por exemplo), daria à companhia melhores condições para otimizar a sua operação com máxima qualidade de serviço. Isso porque esse tipo de informação seria muito útil nos processos de planejamento e dimensionamento da rede de distribuição e principalmente no processo de gerenciamento de perdas de energia. A questão das perdas é um fator importante porque afeta diretamente a rentabilidade da operação. No Brasil, de acordo com dados da ABRADDEE<sup>2</sup> e da ABRACE<sup>3</sup> [ABR03], o índice médio de perdas globais de energia está próximo de 16%, o que é ainda uma média elevada, mas melhor do que o patamar médio de alguns anos atrás, que já foi superior a 20%. As melhores empresas têm perdas globais [GAZ02] da ordem de 6,5% a 8%. Outras estão um pouco acima da média nacional, em torno de 20%, mas há casos em que as perdas globais já atingiram valores bem acima da média nacional, como 28% e até de 40%. As perdas globais são resultantes da soma das perdas técnicas, cujos índices giram em torno de 5% a 7% em média, e das chamadas perdas comerciais, que são decorrentes basicamente de fraudes praticadas pela população. Aqui existe um ponto crítico, principalmente em algumas regiões do Brasil. As fraudes, juntamente com a inadimplência, além de gerarem uma perda de receita direta, acabam por aumentar os custos de operação, pois, medidas de praxe para situações desse tipo na área de prestação de serviços, como corte/reativação do fornecimento do serviço, no âmbito das companhias de distribuição de energia elétrica são operações caras, por demandarem o envio de equipes em campo, além de estarem sujeitas a outras complicações, de ordem legal e até de segurança (por exemplo, corte de energia em certas favelas ou em áreas de invasão de terras). Portanto, o gerenciamento de perdas de energia e da inadimplência é uma questão relevante na operação de distribuição de energia elétrica e a disponibilidade de informações detalhadas sobre o perfil de consumo de cada residência seria de grande auxílio nesse processo. Entre outros usos, por exemplo, essas informações poderiam ser aplicadas no gerenciamento utilizando programas computacionais

---

<sup>2</sup> ABRADDEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica

de fluxos de potência que permitiriam calcular as perdas em cada trecho da rede. Dessa forma, a companhia teria meios para uma atuação mais precisa e eficaz sobre as causas geradoras de perdas. Além disso, a disponibilidade do perfil diário detalhado de consumo teria importante uso na determinação de tarifas. As regras estabelecidas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [ANE02], em decorrência dos processos de privatização, determinam que as perdas globais não podem mais ser repassadas integralmente para as tarifas. Existem mecanismos para incentivar as companhias de distribuição a reduzirem as perdas e a investirem em programas de conservação de energia. E uma parte dos ganhos obtidos deve ser convertida em benefício dos consumidores através de redução da tarifa. Outro aspecto importante e de grande interesse para as companhias é que o registro diário detalhado do consumo viabiliza a adoção de tarifas diferenciadas, a chamada tarifa amarela (aplicação de valores mais elevados nos horários de pico), a exemplo do que ocorre na área de telefonia. Haveria aplicação também na área de marketing e comercial, principalmente para a avaliação do comportamento típico de consumidor por regiões, faixas de consumo e ao longo do tempo. Em fim, a disponibilidade das informações detalhadas de consumo diário de cada residência seria muito valiosa, por ter aplicação em diversas áreas de gerenciamento das companhias, desde as áreas técnicas, de operação, engenharia e planejamento, até as áreas comerciais e de marketing.

Entretanto, a disponibilidade da informação de consumo diário detalhado de energia elétrica de cada consumidor não é ainda algo comum de ser observado nas companhias de distribuição de energia elétrica, pelo menos como informação obtida de forma constante e sistemática. O que por vezes é feito é a obtenção de pequenas amostragens, através de monitoração de algumas residências durante um certo tempo ou através de pesquisa junto aos consumidores.

Essa situação, em parte pode ser decorrente das próprias peculiaridades das redes de distribuição de energia elétrica, que em geral se caracterizam pela grande abrangência geográfica, complexidade de topologia, grande capilaridade e custos elevados de manutenção. Considerando que para se obter um perfil diário de consumo de energia para cada residência é necessário coletar as posições de consumo com uma frequência elevada (a cada cinco ou dez minutos por exemplo), isso somente seria possível de ser feito para toda a rede, de forma constante, com um procedimento automático de medição de consumo aplicável em larga

---

<sup>3</sup> ABRACE – Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia

escala. Seria totalmente inviável realizar essa tarefa com um processo de coleta manual, como o que é utilizado hoje em dia na maioria das localidades para fins de faturamento, no Brasil e no mundo. Mas, é interessante notar que, se a companhia tivesse os meios para a coleta de dados de consumo para compor um perfil diário de carga de energia individualizado, estaria por consequência também resolvido, de forma mais segura e eficiente, o problema da coleta de dados para faturamento.

Ou seja, diante do quadro exposto, para se obter uma melhoria significativa nesse contexto de disponibilidade de informações para um melhor gerenciamento de recursos, e de meios para uma atuação operacional mais rápida e eficaz, as companhias de energia precisariam considerar a hipótese de uma solução envolvendo medidores automáticos de consumo e outros dispositivos de controle, ligados a uma rede de comunicação, para coleta de dados de consumo e transporte de sinalização de controle, com a mesma abrangência e capilaridade que a própria rede de distribuição de energia elétrica a ser monitorada e que ainda assim tivesse um custo baixo, já que os valores médios de faturamento por domicílio são relativamente pequenos e os custos de manutenção da rede elétrica por si já são elevados.

Na verdade, as questões envolvendo *Leitura Automática de Medidores de energia (AMR, Automatic Meter Reading)* e *Sistemas de Automação de Distribuição de energia (DAS, Distribution Automation System)*<sup>4</sup> são fundamentais e estratégicas para o futuro das companhias de distribuição de energia. Cada vez com mais frequência e intensidade, governo e companhias de energia serão cobrados pela sociedade no sentido de aprimorarem seus processos de gerenciamento de tal forma que se possa ter um mínimo de garantia de que a energia elétrica estará sempre disponível a todos, na quantidade necessária e com preço acessível a toda a população, pois se trata de bem essencial imprescindível ao modo de vida moderno. Como bem sabem os brasileiros, agora muito mais do que antes da crise.

Por ser um aspecto de alta relevância para as companhias de distribuição de energia de todo o mundo, a indústria tem investido em soluções para medição automática de consumo de energia, principalmente em se tratando de grandes consumidores. Mas em se tratando de pequenos consumidores, ainda não se têm notícia de soluções adotadas em larga escala. Existem apenas algumas experiências em andamento. A questão chave é como obter soluções que sejam não somente melhores do ponto de vista tecnológico, mas também que apresentem um custo compatível com o benefício. O problema do custo fica mais fácil de ser equacionado

---

<sup>4</sup> Também referenciados na literatura como sistemas de monitoração e controle, ou de telemetria

quando se trata de grandes consumidores, como por exemplo certas indústrias, que em um único ponto (medidor) geram receita suficientemente elevada para permitir às companhias de energia investirem em uma solução de coleta automatizada, como já tem acontecido na prática. De modo semelhante, podem ser tratados os grandes condomínios verticais, sejam eles comerciais ou residenciais. Apesar de nesse caso normalmente existir um medidor individual para cada empresa ou apartamento, o fato de eles estarem concentrados em um único ponto permite soluções técnicas que mesmo demandando maior investimento oferecem uma boa relação custo/benefício devido ao grande número de consumidores envolvidos. Além disso, a existência de uma relação comercial mais forte entre condomínio e companhia de energia proporciona a esta última maior segurança quanto ao retorno do investimento ao longo do tempo.

O grande desafio está em encontrar soluções que sejam adequadas para uso nas regiões de menor densidade de consumo e grande abrangência geográfica, tipicamente encontrada nas áreas residenciais horizontalizadas. Ou seja, o desafio é interligar os medidores residenciais em uma rede de comunicação de dados de alta capilaridade, mas que tenha um custo médio por consumidor bastante baixo. Na verdade, a situação aqui é similar aos desafios já conhecidos e referenciados pela área de telecomunicações como o “desafio da última milha” (ou da “primeira”, como preferem alguns), expressão que resume as dificuldades existentes para se aplicar tecnologias disponíveis na oferta de mais capacidade de telecomunicações em cada residência, mas a um custo aceitável.

Do ponto de vista das companhias de distribuição de energia elétrica, uma solução adequada para esse cenário deveria contemplar ainda os seguintes aspectos: investimento inicial não muito elevado, possibilidade de implantação gradativa, e baixo custo de operação.

Essas condições indicam que a tecnologia Bluetooth, pelas suas características técnicas, seu baixo custo unitário e pequeno tamanho, poderia ser uma boa alternativa para ser incorporada junto aos medidores e dispositivos de controle de energia e assim formar uma rede de comunicação de alta capilaridade, que iria suportar as demandas de um sistema centralizado de telemetria de distribuição de energia.

Dessa forma as companhias de distribuição de energia elétrica poderiam contar com os benefícios de um sistema centralizado de monitoração e controle de distribuição de energia baseado em medidores eletrônicos, que poderiam ser colocados diretamente nos postes, interligados através de uma rede de comunicação *wireless*. Essa rede de comunicação

permitiria não somente a coleta automática e freqüente dos dados de consumo, enviando-os para um servidor central, como também possibilitaria o transporte de mensagens de controle e sinalização para que certas intervenções na rede de distribuição de energia elétrica fossem feitas remotamente, como por exemplo, a ativação/desativação do fornecimento de energia para uma residência específica. Permitiria ainda a coleta automatizada sobre a ocorrência de certos eventos, como alarmes de segurança contra tentativas de violação dos dispositivos, ou mesmo o registro de quedas de fornecimento de energia, para a formação de diversos indicadores de qualidade de serviço, que são exigidos pela ANEEL.

Nesse desenho de solução, a colocação dos medidores diretamente nos postes é importante como medida de prevenção de fraudes, na forma como geralmente é praticada hoje em dia. É importante também que os medidores sejam dispositivos pequenos e de baixo consumo de energia. A possibilidade de comandar a ativação/desativação de fornecimento remotamente, além de ganhos de ordem operacional, é um importante aliado no gerenciamento de inadimplência (evitaria o alto custo e as complicações e riscos da forma atual de se executar esses procedimentos, que faz com que a desativação por inadimplência seja geralmente postergada ou mesmo evitada.).

A proposta de uma rede *wireless* pelo menos no segmento de “última milha” visa atender requisitos de custo e facilidade de manutenção. É claro que à primeira vista, intuitivamente, a idéia de passar um cabo coaxial pode parecer atrativa. Afinal, já está montada toda uma estrutura de postes de suporte. Entretanto, o custo dessa solução é elevado e pode apresentar sérios problemas de manutenção, inclusive porque essa mesma estrutura é compartilhada também por cabos usados para outros serviços, por exemplo, telefonia e tv a cabo. Alternativas como as tecnologias PLC (*Power Line Carrier*) [ROS01] parecem ser promissoras, mas têm ainda grandes obstáculos a serem superados até se tornarem viáveis, principalmente devido a grande diversidade de tipos de linhas de distribuição de energia [ALV01], além de questões regulamentares e do próprio custo envolvido. Uma abordagem freqüente para contornar a questão do custo do PLC é a oferta de serviços de transmissão de dados, como por exemplo o acesso à Internet, aproveitando-se do fato de que essas tecnologias geralmente oferecem uma capacidade de banda bastante elevada (taxas de dados em rajadas de até 20 Mb/s na rede elétrica de uma residência [ROS01], por exemplo). Entretanto, ao se considerar o perfil médio do consumidor residencial de energia elétrica no Brasil verifica-se que apenas uma pequena parcela tem potencial para contratar também os

serviços de transmissão de dados. Ou seja, o perfil sócio-econômico de muitas regiões urbanas no Brasil indica que a maior parte da população mal tem condições de pagar pelo uso básico de energia elétrica e certamente não terá demanda por serviços agregados de transmissão de dados. Portanto, mesmo considerando-se que o PLC supere todos os seus desafios de ordem técnica, o mais provável é que sua aplicação se viabilize apenas para alguns segmentos de mercado. Para os demais segmentos as companhias de distribuição de energia elétrica continuarão dependendo de uma solução de rede de comunicação de dados de baixo custo, que seja adequada para atender apenas às suas próprias necessidades. Portanto, nesse contexto de aplicação, as tecnologias PLC e alternativas *wireless*, como Bluetooth, seriam complementares e não concorrentes entre si.

A disponibilidade dos dados de consumo numa base central propiciaria uma série de vantagens para operações de gerenciamento da companhia de distribuição de energia. Possibilitaria também o oferecimento de mais informações aos consumidores, inclusive através de canais alternativos. Imagine por exemplo que, numa situação de crise de energia como a que o país acabou de passar, o consumidor pudesse acompanhar a evolução de seu consumo através da Internet, confortavelmente em frente ao seu micro, em casa ou no escritório, ou por consulta telefônica (através de sistema de resposta audível), ou ainda em qualquer lugar através de seu celular com WAP. Outras possibilidades de serviço também ficam facilitadas pelo sistema proposto. Por exemplo, pode-se mencionar o desenvolvimento de uma alternativa para venda de energia pré-paga, de baixo custo e grande facilidade operacional, pois seria controlada remotamente pelo sistema. E se pensarmos mais em longo prazo, quando tivermos disponíveis medidores automáticos também para água e gás, haveria uma boa possibilidade de integrar os serviços de coleta de consumo na mesma rede de comunicação.

No cenário de solução desenhado acima, a maioria dos recursos e funcionalidades mencionadas se enquadram como características comuns dos sistemas aplicativos tipo cliente/servidor, existentes na rede Internet e nas empresas, envolvendo apenas a aplicação de tecnologia já amplamente difundida. Entretanto, existem dois pontos fundamentais que merecem destaque. O primeiro refere-se à disponibilidade de dispositivos medidores eletrônicos automatizados que devem ser de custo baixo, com pequeno tamanho e baixo consumo de energia. O segundo aspecto importante é a possibilidade de fazer esses dispositivos se comunicarem com frequência apropriada com um servidor central, através de

um serviço ou rede de comunicação própria que seja confiável, com capacidade de tráfego adequada, e também de baixo custo. Existem ainda, em ambos os casos, um certo grau de dificuldade e desafio em termos de desenvolvimento tecnológico. A questão de interesse abordada por este estudo refere-se ao último aspecto mencionado, ou seja, a necessidade de uma rede de comunicação de dados adequada para interligar diversos dispositivos espalhados em uma grande área geográfica. Essa necessidade molda um quadro bastante propício para se constituir em novo cenário de aplicação da tecnologia Bluetooth.

## 1.2. Desafio

A simples incorporação da tecnologia Bluetooth em medidores eletrônicos de energia, dando suporte a uma aplicação de coleta periódica de dados, feita por alguém passando pelas ruas munido de um equipamento portátil (um laptop, ou palmtop, por exemplo), com o qual faria a leitura de consumo mensal das residências, certamente seria, por si só, um trabalho interessante de uso da tecnologia, visto se tratar de uma aplicação inovadora e útil, ainda que se constitua num uso mais simples e direto das características e recursos oferecidos pela tecnologia Bluetooth.

O cenário de aplicação objeto deste estudo inclui um ambiente mais complexo, pois se considera a busca de uma solução de rede de comunicação de dados *wireless* de grande abrangência geográfica, alta capilaridade e baixo custo. Ele exige, portanto, uma exploração mais ampla e profunda da tecnologia Bluetooth, incluindo inclusive recursos que, apesar de previstos na especificação, não estão ainda plenamente desenvolvidos, como é o caso das *scatternets* (abordado no capítulo 3).

O desafio proposto foi então de pesquisar e avaliar a aplicabilidade da tecnologia Bluetooth como rede de comunicação *wireless* de suporte a um sistema automatizado de monitoração e controle de distribuição de energia elétrica, tal como mencionado anteriormente.

A principal questão a ser equacionada seria as distâncias que podem estar envolvidas numa rede de distribuição de energia elétrica, já que a tecnologia Bluetooth em princípio está voltada para rede de curtas distâncias, 10 metros para as aplicações mais comuns, com dispositivos da classe 3, ou até 100 metros se for usado um rádio da classe 1.

A solução teórica vislumbrada a priori foi a concatenação de várias redes Bluetooth (*piconets*), formando grandes redes de dispersão, as *scatternets* (ver capítulo 3). Estas,

dimensionadas de forma a carrear adequadamente o volume de tráfego previsto, poderiam a princípio atender áreas geográficas com raio de alguns quilômetros, até pontos de concentração a partir dos quais os tráfegos agregados seriam escoados por um tipo diferente de solução de rede, considerando-se que esses pontos já não estariam mais na faixa de grande capilaridade, típica da “última milha”.

Entretanto, essa visão prévia de solução traz consigo outros desafios, principalmente porque o uso de *scatternets* ainda é assunto em fase de desenvolvimento. Desse modo, outras questões ainda precisariam ser respondidas, entre as quais destaca-se:

- **qual topologia de rede deveria ser adotada?**
- **como formar e estruturar *scatternets* de capacidade adequada?**
- **como fazer o roteamento de mensagens nas *scatternets*?**

Acrescente-se ainda o interesse em se alcançar soluções com uma certa generalidade, que permitissem a sua aplicação em outros cenários similares.

Portanto, em resumo, os maiores desafios em torno do presente trabalho dizem respeito principalmente às questões decorrentes do uso de grandes *scatternets* para dar cobertura de comunicação para milhares de dispositivos eletrônicos dispersos em uma grande área geográfica, interligando-os em rede com performance adequada e baixo custo.

### **1.3. Proposta**

Este trabalho teve como propósito geral estudar a interconexão de redes Bluetooth visando à formação de redes de comunicação de dados *wireless* que permitam a interligação de dispositivos eletrônicos dispersos em grandes áreas geográficas, como é o caso dos medidores de energia elétrica.

No capítulo 4 é definido um modelo de um sistema automatizado de monitoração e controle de distribuição de energia elétrica em região urbana, que foi usado como referência para o estudo de viabilidade de aplicação da tecnologia Bluetooth nessa área em particular, e também em outras situações que demandem a utilização de dispositivos dispersos geograficamente.

Para se atingir o objetivo geral proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisar e estudar as questões envolvendo a formação e uso de redes de dispersão Bluetooth (*scatternets*), tais como topologia, protocolos de roteamento, capacidade de

comunicação das *piconets*, estabelecimento das conexões, etc., com ênfase na avaliação das questões aplicáveis ao caso proposto como referência de estudo.

- Definir os contornos e requisitos básicos de informação e funcionalidade de um sistema automatizado de monitoração e controle de distribuição de energia elétrica para uma área urbana, que foi adotado como modelo de referência, com ênfase nos aspectos que demandam recursos de comunicação de dados.
- Desenvolver uma alternativa de projeto para uma rede de comunicação *wireless* com capacidade adequada para suportar as necessidades do modelo de sistema em referência, explorando os recursos da tecnologia Bluetooth, principalmente nas áreas de maior capilaridade da rede de energia elétrica.
- Considerar a possibilidade de aplicar os resultados obtidos em outros cenários similares que envolvam a necessidade de comunicação com dispositivos dispersos em grandes áreas geográficas, baseados na tecnologia Bluetooth

A metodologia de trabalho utilizada para alcançar os objetivos estabelecidos considerou a realização de atividades orientadas por dois eixos principais. O primeiro deles estava orientado para o desenvolvimento de atividades de estudo teórico e pesquisa baseada principalmente na literatura disponível sobre a tecnologia de redes em geral e em especial sobre redes Bluetooth. E o segundo eixo estava orientado para as atividades de aplicação da tecnologia e conhecimento disponível para a solução de um problema específico, mas relevante, no contexto do mundo atual em que vivemos.

A combinação desses dois focos, em que o conhecimento teórico alimenta as possíveis alternativas de solução de um problema, e, de outro lado, os problemas específicos de um caso concreto tomado da realidade atual fomentam e orientam a busca de mais conhecimento teórico, num processo contínuo de sinergia entre a prática e a teoria, resultou numa dinâmica de trabalho de maior eficácia.

Devido à envergadura do caso adotado como referência para estudo e pesquisa, foi necessário limitar o escopo do trabalho. Assim o desenvolvimento do modelo de sistema limitou-se às etapas de estudo e projeto inicial, que foram desenvolvidas ao nível de abstração suficiente para fomentar e orientar a pesquisa teórica e constatar viabilidade de aplicação da tecnologia Bluetooth como inicialmente vislumbrada. Dessa forma, as atividades de projeto detalhado e implementação poderiam vir a ser desenvolvidas em trabalhos futuros.

Os resultados obtidos neste trabalho são bastante relevantes haja vista o estágio de maturidade ainda inicial em que se encontram os temas objetos de pesquisa e a própria amplitude e complexidade do problema tomado como referência de estudo. Basta lembrarmos que somente agora os primeiros produtos de consumo utilizando a tecnologia Bluetooth começam timidamente a chegar ao mercado e que sistemas de medição automática de energia elétrica em larga escala são ainda novidade não só no Brasil, mas também na maior parte do mundo.

#### 1.4. Contexto Tecnológico

A comunicação *wireless* (sem fio) é sem sombra de dúvida um dos temas mais atuais na área de telecomunicações e de informática. Isso é devido, em grande parte, ao crescimento vertiginoso da venda de celulares, PDAs e outros dispositivos móveis. Foram mais de 800 milhões<sup>5</sup> de celulares apenas nos dois últimos anos, só para citar um exemplo. Ao lado disso, avançou também a disponibilidade de serviços para Internet móvel, através de WAP, de i-Mode (Japão) ou de redes locais sem fio do tipo Wi-Fi (IEEE802.11). A tendência de demanda cada vez maior por equipamentos e serviços que possam ser usados em qualquer hora e em qualquer lugar, e por conseqüência, a necessidade de conectar diversos tipos de dispositivos e fazê-los interagir, quer seja para sincronizar dados, passar mensagens escritas, para se comunicar via voz, para controlar outros equipamentos, para monitorar a saúde de indivíduos, para ouvir música, para ver um vídeo, para jogar, ou, em fim, por qualquer que seja o motivo, parece não ter limites. Para atender essas expectativas, a indústria vem investindo pesado em diversas tecnologias, abrangendo desde soluções de redes de longa distância, como, por exemplo, a tecnologia celular de terceira geração (3G), passando por soluções de redes locais *wireless* (WLAN), onde o padrão IEEE 802.11x ainda é o destaque, até soluções *wireless* para redes de curta distância (*PAN*, de *Personal Área Network*), onde diversas soluções brigam por espaço de mercado (por exemplo IrDA, HomeRF e Bluetooth).

Nesse contexto de comunicação sem fio, a tecnologia Bluetooth é das mais recentes, com foco orientado mais fortemente para o que convencionalmente se chama de WPAN (*Wireless PAN*, ou Rede Pessoal Sem Fio), mas com recursos para trabalhar de forma cooperativa com outros tipos de redes, tanto na faixa local quanto na faixa de alcance global. Trata-se de uma tecnologia bastante poderosa, com suporte apropriado para canais de voz e de

---

<sup>5</sup> Gazeta Mercantil, 2002

dados, com velocidade bruta total de até 1 Mbps e que por suas características de custo, tamanho e consumo de energia, tem um papel importante a desempenhar, especialmente pelo grande crescimento do mercado de dispositivos móveis.

A tecnologia Bluetooth é resultado do esforço de um grupo de empresas que, a partir de pesquisas realizadas pela Ericsson, se uniram com o propósito de estabelecer um padrão aberto e livre de licenciamento para comunicação entre dispositivos, disponível em escala global, e que fosse baseado em um único chip, de baixo custo (inferior a \$5 dólares), tamanho pequeno e baixo consumo de energia, de modo a poder ser incluído virtualmente em qualquer dispositivo eletrônico, particularmente os dispositivos móveis, como celulares e PDA's. Para desenvolver essa tecnologia foi formado o Bluetooth SIG (*Special Interested Group*), que é suportado por grandes empresas, entre elas, Ericsson, IBM, Motorola, Toshiba, Microsoft, Nokia, Intel, 3Com, Lucent, além de mais de 3000 empresas que, conforme [BIS01], já aderiram ao padrão e pretendem fabricar dispositivos e equipamentos que incorporam a tecnologia Bluetooth .

A primeira especificação da tecnologia Bluetooth foi publicada em julho de 1999, sendo depois complementada, na versão 1.1, em fevereiro de 2001 [BHA01]. Mas somente agora os produtos de consumo utilizando essa tecnologia começam a ser lançados de maneira mais expressiva no mercado. Ela foi originariamente pensada para substituir os cabos usados para conectar diferentes tipos de equipamentos. Com ela pode-se, por exemplo, conectar uma impressora, teclado, mouse, câmara fotográfica digital, PDA, e similares, a um micro de mesa ou um notebook sem se incomodar com os diferentes tipos de cabos normalmente requeridos para isso. Mas a idéia inicial foi ampliada, de modo que diversos cenários podem ser alvos de aplicação da tecnologia Bluetooth. Muitos desses cenários, referenciados como modelos de uso, já foram definidos e padronizados, pelo Bluetooth SIG, através de perfis técnicos, de modo a se garantir a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes. Os modelos de uso e perfis técnicos incluídos na especificação atual (versão 1.1) abrangem aplicações como “*desktop* sem fio”, o telefone do tipo “3 em 1” (que se comunica com a rede de telefonia fixa, com o provedor de serviço celular, e funciona em casa como telefone sem fio interno), o ponto de acesso para a rede Internet ou para rede local, e suporte para troca de arquivos em redes ad hoc, apenas para citar alguns exemplos. Além disso, novos modelos de uso estão em fase de desenvolvimento, devendo ser incorporados nas futuras versões da especificação Bluetooth [MIL01] .

A tecnologia Bluetooth tem por base uma pilha de protocolos padronizados e um rádio RF, que opera na banda de 2.4 GHz, uma banda livre de licenciamento disponível globalmente, utilizando técnicas de salto de frequência em banda larga, a uma taxa de 1600 saltos por segundo, o que combinado com a adoção de um tamanho de pacote pequeno lhe garante bom nível de imunidade contra interferências de outros equipamentos eventualmente operando na mesma banda. O rádio possui um alcance que vai de 10 a 100 metros de distância, dependendo da classe de dispositivo, entretanto a mais comum é a classe 3, que é limitada a 10 metros. Seu protocolo banda base é uma combinação de comutação de pacotes e de circuitos. Ele possui capacidade para estabelecer canais de comunicação síncronos e assíncronos, com recursos para transmissão de voz (até 3 canais de 64 Kbps em PCM) e transmissão de dados. A velocidade máxima total agregada é de 1 Mbps, mas o *payload* é menor, com estimativas indicando taxas de transferência de no máximo 721 Kps [AUS00].

Na tecnologia Bluetooth a conexão de dois ou mais dispositivos recebe o nome de *piconet*. As *piconets* se caracterizam por terem uma topologia em estrela, sendo que um dos dispositivos participantes em uma mesma *piconet* exerce o papel de mestre, enquanto os demais exercem o papel de escravos. Cada *piconet* suporta a conexão de uma grande quantidade de dispositivos, mas no máximo 7 dispositivos escravos podem estar se comunicando ativamente com o dispositivo mestre. Existe ainda a possibilidade de um dispositivo participar como membro em mais de uma *piconet* concorrentemente. Dessa forma é possível conectar várias *piconets* entre si, formando uma rede de dispersão, chamada de *scatternet*.

A tecnologia Bluetooth possui também alguns recursos de segurança, que podem ser usados para controlar e proteger as conexões entre dispositivos. Esses recursos incluem chaves de autenticação, de criptografia, código de identificação pessoal (PIN, *Personal Identification Number*) e o uso de esquemas de segurança dos protocolos transportados nas camadas superiores.

Uma visão geral mais detalhada de toda a tecnologia Bluetooth, incluindo sua arquitetura, protocolos, recursos de segurança, modelos de uso e perfis técnicos, comparação com outras tecnologias, obtida a partir das principais fontes bibliográficas, pode ser vista no capítulo 2 deste documento. No capítulo 3 é abordada com mais profundidade as questões relativas à formação e uso de redes Bluetooth baseadas em *scatternets*.

## 1.5. Contribuição

Uma primeira contribuição que esse trabalho oferece, no contexto de aplicação, é a própria proposta de uso da tecnologia Bluetooth para formar uma rede de comunicação *wireless* capaz de interligar medidores de energia elétrica dispersos em ampla área geográfica, pois até onde se sabe, trata-se de uma proposta inovadora, que expande as possibilidades de uso da tecnologia Bluetooth para além dos cenários e perfis inicialmente previstos pela sua especificação atual, cujo foco principal são os cenários de WPAN (*Wireless Personal Area Network*) e redes ad hoc móveis de curta distância.

Outra contribuição é a definição de uma proposta de arquitetura de rede que combina o uso de grandes *scatternets* com redes padrão Internet para viabilizar a construção de uma rede *wireless* de cobertura geográfica mais ampla e baixo custo por ponto atendido. Com isso, de um lado se mantém as vantagens oferecidas para o desenvolvimento de aplicações na plataforma padrão Internet, e de outro se permite a exploração dos pontos fortes da tecnologia Bluetooth em uma gama maior de dispositivos eletrônicos, na medida em que se aumentam as possibilidades de alcance.

A principal contribuição desse trabalho, no que se refere ao uso de *scatternets*, é a proposta de uma topologia de rede e algoritmo de roteamento associados à definição de uma estrutura para a formação de *scatternets* que, caracterizando uma camada de serviço de rede (SRBT), viabilizam a criação e uso de uma rede Bluetooth de grande porte, com capacidade apropriada (conforme demonstrado na seção 4.4) não só para dar suporte ao sistema de telemetria de distribuição de energia tomado como referência, mas também para outros cenários similares, onde haja necessidade de uma rede *wireless* para interligar diversos dispositivos eletrônicos dispostos em ampla área geográfica, como por exemplo sensores de segurança, medidores de gás, e outros.

## 1.6. Organização

Neste primeiro capítulo foi apresentada uma breve exposição dos motivos e desafios dessa proposta de trabalho, os seus objetivos principais, escopo, metodologia utilizada, bem como uma breve visão do contexto tecnológico no qual ela está inserida e das contribuições que apresenta.

Nos capítulos 2 e 3 a seguir apresenta-se uma descrição geral da tecnologia Bluetooth, baseada nas principais referências bibliográficas existentes. No capítulo 2 aborda-se os

aspectos fundamentais da especificação Bluetooth e no capítulo 3 a exposição é mais focalizada nas questões que envolvem a formação e uso de *scatternets*.

O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento dos objetivos propostos nesse trabalho. O sistema de telemetria adotado como modelo de referência para o estudo é mais bem caracterizado e uma solução geral de rede de comunicação de dados que suporte tal sistema é apresentada. O uso de *scatternet* é um dos pilares dessa proposta e para tanto é delineada uma solução que envolve uma topologia e algoritmo de roteamento associados a uma estrutura de formação das *scatternets* que, caracterizando uma camada de serviço de rede (SRBT), viabilizam o uso de Bluetooth em áreas geográficas mais amplas, como é o caso do cenário considerado, envolvendo medidores de energia elétrica. O trabalho inclui também uma avaliação da capacidade de tráfego dessas *scatternets* diante dos volumes de dados previstos para a aplicação de telemetria adotada como referência, visando demonstrar a sua viabilidade.

E, finalmente, na conclusão (capítulo 5) apresenta-se um resumo dos resultados obtidos com o presente estudo e são indicados os principais pontos que são objetos de trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Fundamentos da Tecnologia Bluetooth

Embora seja ainda uma tecnologia bastante recente, Bluetooth é atualmente uma das mais importantes tecnologias para suporte a comunicação *wireless* de curta distância, e vem sendo amplamente adotada pela indústria de dispositivos eletrônicos e de telecomunicações.

Este capítulo aborda a tecnologia Bluetooth, oferecendo uma visão geral de sua arquitetura, seus principais recursos, seus mais importantes cenários de aplicação, bem como seu posicionamento em relação a outras tecnologias *wireless* disponíveis no mercado.

### 2.1. Introdução

Pode-se facilmente constatar que a mobilidade da comunicação de voz já faz parte do nosso dia-a-dia, decorrente do crescimento explosivo das redes de telefonia celular, observado nos últimos anos em todo o mundo. Dessa forma, portar um telefone celular em qualquer lugar que se vá, já se transformou em hábito para milhões de pessoas do mundo todo. Mas além do aparelho celular, é notório o crescimento de uso de outros pequenos aparelhos. Exemplos deles são os palmtops, computadores laptops, pequenas impressoras, dispositivos de som MP3, etc. De acordo com [BHA01], em muitos casos esses equipamentos não possuem uma interface de comunicação de dados compatível, ou, se têm, geralmente as interfaces requerem o uso de desconfortáveis conexões via cabo e de procedimentos de configuração. A solução óbvia e ideal para esse tipo de problema seria a eliminação dos cabos de conexão através de uma tecnologia de comunicação sem fio, padronizada, barata e amplamente adotada pela indústria, facilitando assim a conectividade entre os diversos tipos e marcas de equipamento que as pessoas costumam ou gostariam de carregar consigo.

Em 1998 cinco grandes companhias (Ericsson, Nokia, IBM, Toshiba e Intel) formaram um grupo com o objetivo de criar uma tecnologia para conectividade sem fio universal, livre de licenciamento, para ser usada no mercado de pequenos equipamentos portáteis. O resultado desse esforço é o **Bluetooth**. Seu nome se refere a Harald Bluetooth, um rei Viking do século X que unificou as diversas tribos da Dinamarca e a Noruega sob uma mesma coroa [DOR01]. Os criadores da tecnologia Bluetooth esperam que ela possa ser a base para a unificação das soluções de conexão entre dispositivos, substituindo os diferentes tipos de cabos que são usados hoje em dia.

A especificação Bluetooth, que está no momento em sua versão 1.1, [BHA01] define uma interface de rádio frequência (RF) para comunicação sem fio de curta distância na banda 2.4 GHz e o conjunto de protocolos de comunicação associados, bem como um conjunto de perfis baseados em diferentes modelos de uso.

A especificação Bluetooth 1.1 foi liberada em fevereiro de 2001, definindo todos os aspectos da tecnologia Bluetooth, inclusive componentes de hardware e software, processos e procedimentos compartilhados. Ela consiste de duas partes: a especificação **principal** e os **perfis**. A especificação principal define todas as camadas da pilha de protocolos Bluetooth. Enquanto que os perfis definem como os fornecedores de soluções devem usar os serviços oferecidos pela pilha de protocolos para criar uma variedade de aplicações, conforme modelos de uso já estabelecidos, para maior garantia de interoperabilidade entre dispositivos de fornecedores diferentes.

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma: na seção 2.2 é apresentada uma visão geral da especificação principal do Bluetooth, envolvendo aspectos relativos a sua arquitetura básica, a sua pilha de protocolos, a forma de se estabelecer conexões entre dispositivos Bluetooth, formando redes de curta distância e finalmente os seus principais recursos de segurança. Na seção 2.3 são apresentados os principais modelos de uso para a tecnologia Bluetooth e o conceito de perfis, incluído na especificação para orientar o desenvolvimento de aplicações apropriadas a cada um dos modelos e que possam ser interoperáveis. Já na seção 2.4 é descrito de modo resumido cada um dos perfis Bluetooth, bem como a forma como eles estão organizados. Na seção 2.5 é feita uma breve exposição sobre as principais tecnologias que concorrem com o Bluetooth e aquelas que podem ser usadas de modo complementar. Na seção 2.6 são mencionados os principais trabalhos em

desenvolvimento visando futuros acréscimos à tecnologia Bluetooth. E finalmente, na seção 2.7, é apresentada uma conclusão sucinta sobre o assunto.

## 2.2. A Especificação Principal Bluetooth

Essa parte da especificação Bluetooth apresenta sua arquitetura, descreve seus componentes e define todas as camadas da pilha de protocolos Bluetooth, além de estabelecer requisitos para teste e verificação de conformidade com as especificações Bluetooth, que deverão ser observados pelos fabricantes de produtos que utilizam a tecnologia.

### 2.2.1. Arquitetura Bluetooth

De acordo com [MIL01], um dispositivo Bluetooth é qualquer produto eletrônico completo que incorpora um rádio Bluetooth. Em termos práticos, um dispositivo Bluetooth poderia ser um telefone móvel, um PDA (*Personal Digital Assistant*), um computador portátil, uma impressora, um scanner, um *headset*. Desde que o produto completo incorpore a tecnologia Bluetooth (na forma de um rádio Bluetooth e do software operacional correspondente, como mostra a figura 2.1), o produto pode ser denominado um dispositivo Bluetooth. Naturalmente, qualquer dispositivo Bluetooth incorpora mais tecnologia do que apenas o Bluetooth.

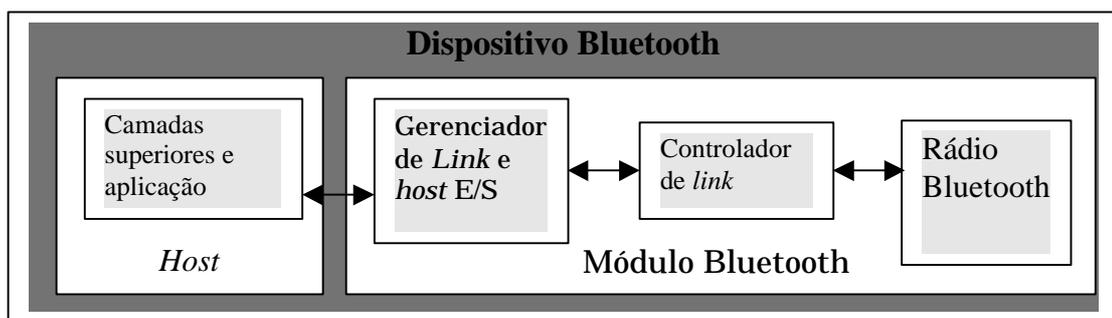


Figura 2.1: Arquitetura de um dispositivo Bluetooth

Na terminologia Bluetooth, a parte não Bluetooth de um dispositivo é denominada *host* e todos os componentes Bluetooth (hardware e software) são combinados no *módulo Bluetooth*. As comunicações entre o *host* e o *módulo Bluetooth* são manipuladas pelo software *Link Manager Bluetooth* e pelo *Host Controller* do módulo Bluetooth. A seguir serão

abordados os componentes principais dessa arquitetura e também os tipos de canais de comunicação que podem ser estabelecidos entre dois dispositivos Bluetooth.

### **Controlador de *Host***

O Controlador de *Host* é a parte do módulo Bluetooth que gerencia toda a comunicação e interação entre o módulo Bluetooth e o dispositivo *Host*, interpretando os dados recebidos do *host* e os direcionando ao componente apropriado do módulo Bluetooth e vice-versa.

Para assegurar a interoperabilidade de módulos Bluetooth procedentes de vários fabricantes, a especificação Bluetooth define uma interface padrão (e protocolo de comunicações) que pode ser usada por todos os módulos Bluetooth e por todos os dispositivos *host* que incorporam a tecnologia Bluetooth. Através dessa interface (*Host Controller Interface – HCI*) um dispositivo *host* pode por exemplo instruir seu módulo Bluetooth para criar uma conexão com um dispositivo Bluetooth específico, executar procedimentos para verificar se existem outros dispositivos Bluetooth dentro de sua faixa de alcance, requerer autenticação, passar uma chave de segurança de conexão, solicitar ativação do modo de operação em baixo consumo de energia, etc.[BIS01]. O *HCI* não será abordado em mais detalhes, mais informações podem ser obtidas em [BLU01a], [BLU01b] e [BRC02].

### **O Rádio Bluetooth**

O principal componente de qualquer dispositivo Bluetooth é o rádio, que se caracteriza pelo seu pequeno tamanho e baixo consumo de energia. O rádio Bluetooth opera na frequência 2.4GHz, utilizando as tecnologias de salto de frequência em banda larga (*Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS*) e a *Time Division Duplexing (TDD)*.

Bluetooth é a primeira tentativa de se fazer um rádio de um único chip que pode operar na banda 2.4GHz. A oferta de processamento de *front-end* de RF integrado com o módulo de bandabase é única [BHA01]. A integração em um só chip baixa o custo da interface de rede, e o tamanho pequeno tornam fácil embutir chips Bluetooth em dispositivos como telefones celulares e PDAs.

A especificação Bluetooth prevê três classes diferentes de rádios, conforme a potência de saída e conseqüentemente o seu alcance. Dessa forma se admite que diferentes dispositivos, previstos para suportar diferentes taxas de transferência de dados, podem ter diferentes necessidades de energia. O tipo mais comum de dispositivo é o de classe 3, que

pode funcionar com alcance de cerca de 10 m. Enquanto que um dispositivo classe 1 poderá alcançar até 100m.

Tabela 2.1: Potência de saída para cada classe de potência Bluetooth [MIL01]

Classe de Potencia	Potencia de Saída	
	Máxima	Mínima
1	100mW (20dBm)	1mW (0dBm)
2	2,5mW (4dBm)	0,25mW (-6dBm)
3	1mW (0dBm)	N/disp.

Deve-se notar também que um dispositivo Bluetooth suporta três modos de consumo de energia. Esses modos determinam o consumo de energia durante diferentes modos de operação, tal como quando um dispositivo está em um estado ativo ou *standby*. Bluetooth define condições para modos de baixa potencia de operação como um mecanismo para conservar a vida da bateria, que é um elemento vital em qualquer dispositivo portátil. O modo de consumo de energia não deve ser confundido com a classe de potencia, pois esta última determina a área de transmissão e o nível de sinal do dispositivo.

Conforme [BHA01], a banda de 2.4 GHz na qual o Bluetooth opera está disponível globalmente sem custo de licença de uso. Europa e EUA alocaram 83.5 MHz para esta banda, mas a Espanha, França e Japão alocaram menor quantidade. Para acomodar essas diferenças, 79 canais de 1 MHz foram definidos para a Europa e EUA, e 23 canais RF de 1 MHz para Espanha, França e Japão. Dessa forma, os dispositivos Bluetooth podem funcionar em qualquer país, exceto nos três mencionados anteriormente, que necessitariam dispositivos com versões locais. Para evitar essa limitação, esforços estão sendo realizados para aumentar a disponibilidade de banda na Espanha, França e no Japão, permitindo assim que dispositivos Bluetooth possam de fato funcionar em qualquer parte do mundo.

Como o Bluetooth usa um sistema de salto de frequência em banda larga, isto significa que o rádio salta através de toda a banda de 79 canais usando uma seqüência de salto pseudo-randômica, a uma taxa de 1600 saltos por segundo, sendo que cada canal é usado para transmissão por 625 $\mu$ s (*slot*) antes que haja um salto para outro canal e assim sucessivamente, conforme ilustrado pela figura 2.1.

Essa técnica de salto de frequência, também usada por alguns produtos de LAN sem fio, é bastante apropriada para implementações de rádio de baixo custo e baixo consumo de energia. A principal vantagem da especificação Bluetooth foi a escolha de parâmetros: uma alta taxa de saltos por segundo, combinado com a escolha de um tamanho de pacote pequeno, deve garantir uma boa imunidade contra interferências de outras fontes na banda de 2.4 GHz [AUS00]. Essa banda, aberta a qualquer sistema de rádio, é bastante utilizada para operação de telefones sem fio, controles de porta de garagem e forno de microondas; sendo este último a fonte de interferência mais forte. Dessa forma, se uma transmissão é misturada com outra fonte, por exemplo um forno de micro-ondas, a probabilidade de interferência no próximo canal saltado é muito baixa.

A velocidade máxima de *link* é 1 Mbps, que é facilmente alcançada usando uma técnica simples de modulação (*Gaussian Frequency Shift Keying* - *GFSK*). Uma técnica de modulação mais complexa poderia alcançar taxas mais elevadas, mas *GFSK* é interessante por que permite manter o projeto de rádio simples e de baixo custo [BHA01].

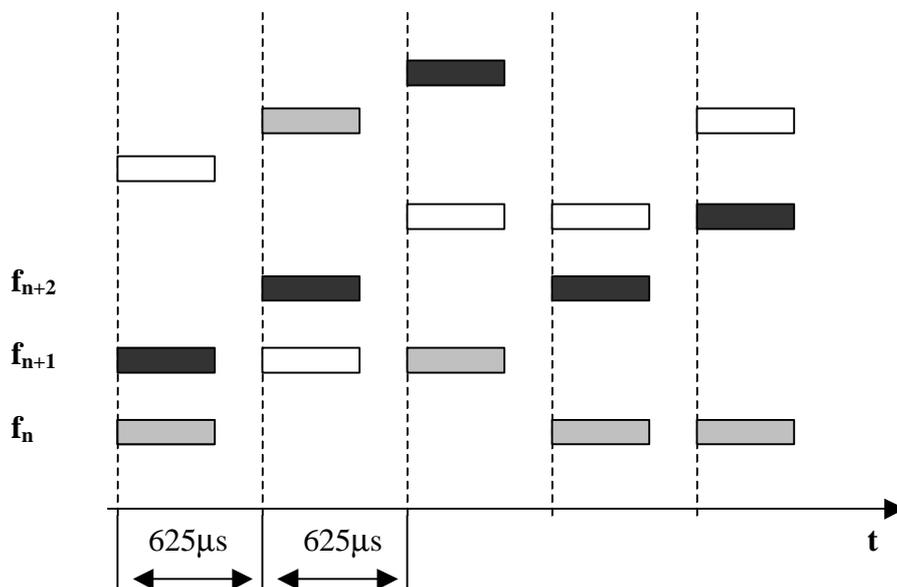


Figura 2.2: Salto de frequência por divisão de tempo [AUS00]

### Canais de Comunicação

Conforme [HEL01], o protocolo Banda Base (permite a conexão física via RF entre dois dispositivos) empregado pelo Bluetooth representa uma combinação da tecnologia de comutação de circuitos e de pacotes. Bluetooth pode suportar um canal de dados assíncrono,

até três canais de voz simultâneos, ou um canal que simultaneamente suporta dados assíncronos e voz síncrona. Cada canal de voz suporta taxa de operação de 64 Kbps em PCM. O canal de dados assíncrono pode suportar a transferência assimétrica de dados a uma taxa máxima de 721 Kbps numa direção, enquanto permite uma taxa de 57.6 Kbps na direção oposta. Além disso, o canal assíncrono pode suportar operações simétricas a uma taxa de 432.6 Kbps. Na Tabela 2.2 a seguir são comparados os tipos de canais.

Tabela 2.2: Suporte a Canais de Comunicação Bluetooth [HEL01]

Canal	Configuração	Tipo de Canal	Taxa de dados máxima para upstream	Taxa de dados máxima para downstream
3	Voz simultânea	Síncrono	64 Kbps x 3	64 Kbps x 3
	Simétrico de Dados	Assíncrono	433.9 Kbps	433.9 Kbps
	Assimétrico de Dados	Assíncrono	723.2 Kbps ou 57.6 Kbps	57.6 Kbps ou 723.2 Kbps

Os canais de voz disponíveis para uso sob o Bluetooth são fornecidos através do uso de comutação de circuitos com uma reserva de *slot* em intervalos fixos. *Slots* podem ser reservados para pacotes síncronos, com cada pacote transmitido usando um salto de frequência diferente. Embora um pacote normalmente seja igual a um simples *slot*, ele pode ser estendido para cobrir um período de até 5 *slots* em tamanho. O *link* síncrono, que fornece a possibilidade de se obter os três canais de voz simultâneos, é referenciado como *Synchronous Connection-Oriented (SCO) link*. Os canais de dados assíncronos são suportados através do uso de comutação de pacotes via um esquema de acesso tipo *polling*. O *link* assíncrono também tem seu próprio acrônimo, sendo referenciado como um *Asynchronous Connectionless (ACL) link*.

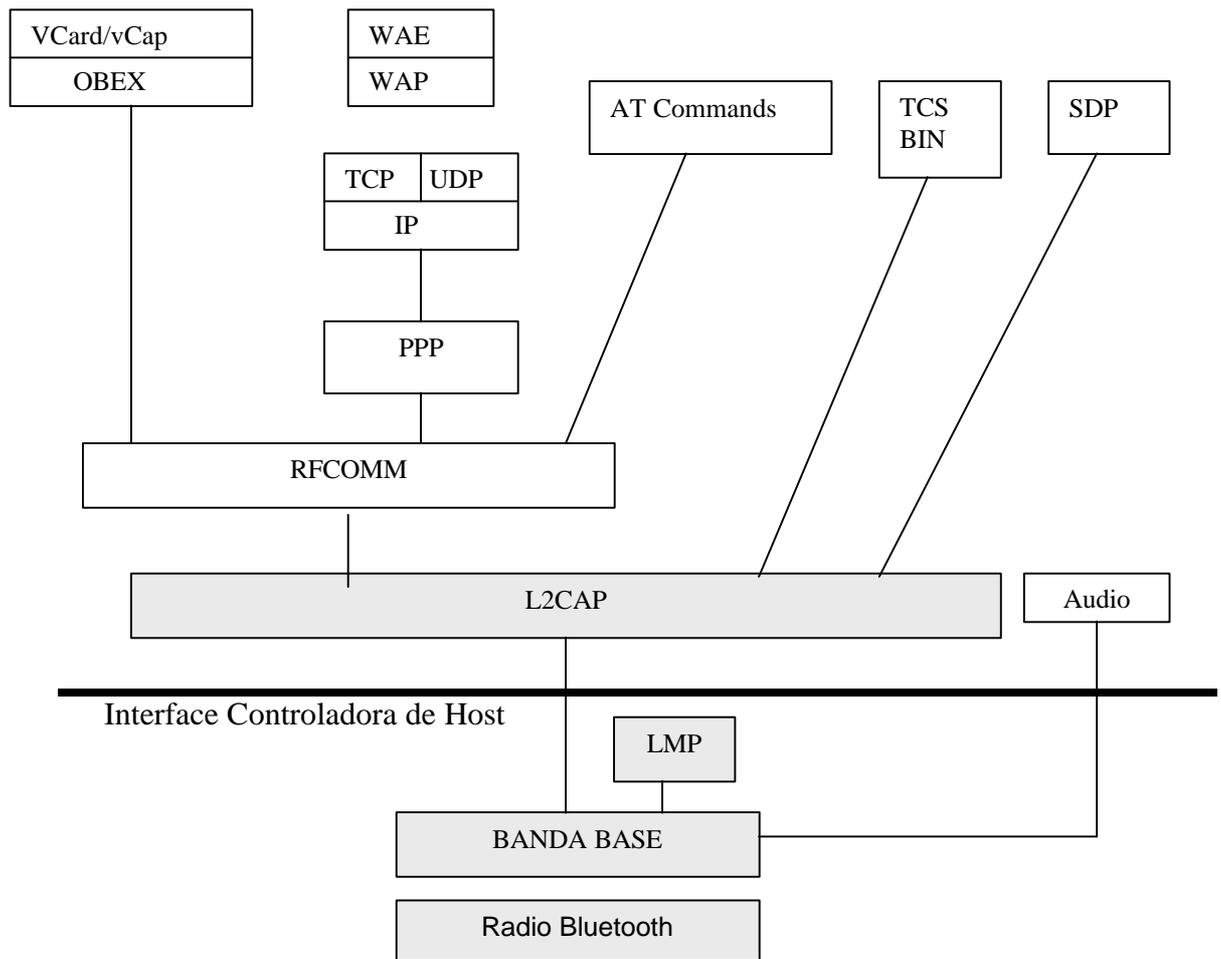
Considerando que o uso desses canais de comunicação pode ocorrer em ambientes diversos, incluindo áreas industriais com máquinas elétricas em funcionamento, o módulo responsável pela transmissão e recepção de dados suporta três esquemas de correção de erros de *bits*. Dois deles são esquemas *FEC (Forward Error Correction)*, o primeiro, usando um pacote tipo *HV2 (High quality Voice)*, é um *FEC* a taxa de 1/3 de dados redundantes e o outro, usando um pacote tipo *HV1*, é um *FEC* a taxa de 2/3, apropriado para transmissões sob condições severas, mas com um grande *overhead* em termos de ocupação de capacidade de

canal. Ambos os esquemas são aplicáveis ao *link* síncrono (*SCO*), que é orientado a conexão e usado para transmitir voz em tempo real. Nesse tipo de *link* pode-se ainda utilizar um tipo de pacote chamado HV3 que, carregando 30 bytes de voz, é transmitido sem código de proteção *FEC* e não é retransmitido em caso de perda ou erro (não tem *CRC*). Por outro lado, obtém-se nesse caso uma melhor taxa de uso do canal e, se usado em ambiente adequado, ainda assim pode manter uma qualidade aceitável, em função das peculiaridades da transmissão de voz em tempo real.

O terceiro esquema de correção de erros é utilizado para os *links* assíncronos, não orientados a conexão, que são usados basicamente para transmissão de pacotes de dados. Nesse caso os dados são protegidos por um esquema ARQ (*Automatic Retransmission Query*) que implica na verificação de erro em cada pacote, baseado num campo de *CRC* (*Cyclic Redundancy Check*). Se algum erro é detectado a unidade receptora indica isso no próximo pacote retornado, de modo que perda ou pacote com erro somente causa o atraso correspondente a um *slot*. Assim a retransmissão é seletiva, aplicável somente aos pacotes com erro. Esse esquema de retransmissão não seria apropriado para transmissão de voz, mas é bastante adequado para transmissão de dados.

### **2.2.2. A Pilha de Protocolos**

De modo similar a outras tecnologias modernas de comunicação, Bluetooth inclui uma pilha de protocolos em sua especificação. A pilha de protocolos, que está ilustrada na figura 2.3 não representa uma pilha de protocolos convencional similar ao modelo de referência OSI (Open System Interconnection), em sete camadas, da ISO (International Standard Organization). Pelo fato de Bluetooth usar comunicação RF e interoperar com modems, telefones e outros dispositivos, seria um pouco difícil categorizar a sua pilha de protocolos de maneira similar as sete camadas do modelo de referência OSI. Ao invés de seguir o modelo de referência OSI, a especificação Bluetooth divide sua pilha de protocolos em quatro camadas, de acordo com propósito do protocolo e se o Bluetooth SIG foi ou não envolvido na especificação das camadas. Na Tabela 2.3 é apresentada a pilha de protocolo de acordo com o seu propósito e se ele foi especificado pelo Bluetooth SIG ou foi um protocolo adotado.



Legenda:

IP	<i>Internet Protocol</i>
IrMC	<i>Ir Mobile Communications</i>
LMP	<i>Link Manager Protocol</i>
L2CAP	<i>Logical Link and Control Adaptation Protocol</i>
OBEX	<i>Object Exchange Protocol</i>
PPP	<i>Point-to-Point Protocol</i>
RFCOMM	<i>Serial Cable Emulation Protocol</i>
SDP	<i>Service Discovery Protocol</i>
TCS BIN	<i>Telephony Control Specification – Binary</i>
WAE	<i>Wireless Application Environment</i>
WAP	<i>Wireless Application Protocol</i>

Figura 2.3: A pilha de Protocolos Bluetooth

No projeto da pilha de protocolos Bluetooth o SIG buscou maximizar a reutilização de protocolos existentes nas camadas superiores, ao invés de reinventar protocolos similares. Os protocolos principais, que são listados na Tabela 2.3, mais a transmissão de rádio Bluetooth, são requeridos pela maioria dos equipamentos Bluetooth, enquanto que os demais protocolos são usados somente quando necessário. Para melhor entender as funcionalidades da

tecnologia Bluetooth, serão examinadas as diferentes camadas da pilha de protocolos e alguns dos protocolos mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Protocolos e camadas na pilha de protocolos Bluetooth [HEL01]

Camada de Protocolo	Protocolos
Protocolos Principais Bluetooth	Banda Base, LMP, L2CAP, SDP
Protocolo de Substituição de Cabo	RFCOMM
Protocolos de Controle de Telefonia	TCS Binary, AT Commands
Protocolos Adotados	PPP, TCP/UDP, IP, OBEX, WAP, vCard, vCal, IrMC, WAE

### Protocolos Principais Bluetooth

Atualmente existem quatro protocolos que compõe a camada principal de protocolos Bluetooth. Esses protocolos são Banda Base, *LMP*, *L2CAP* e *SDP*.

**Banda Base:** o *Baseband and Link Protocol* permite a conexão RF (*Radio Freqüência*) entre dispositivos. Essa camada controla a sincronização de dispositivos Bluetooth e a seqüência de salto de freqüência a ser usada [AUS00]. Ela fornece dois tipos diferentes de *links* físicos, o canal tipo SCO (*Synchronous Connection-Oriented*), cujos pacotes podem transportar voz ou voz e dados, e o canal tipo ACL (*Asynchronous Connection-less*), utilizados apenas para dados. O protocolo Banda Base permite um uso flexível desses tipos de canais, de modo que diferentes pares de dispositivos numa mesma *piconet* podem utilizar diferentes tipos de canais e o tipo de canal pode variar arbitrariamente durante uma sessão. A largura de banda utilizada em cada canal e a quantidade de banda liberada para cada dispositivo escravo é controlada pelo dispositivo mestre [MIL01].

**Protocolo Gerenciador de *Link*:** esse protocolo (*Link Manager Protocol, LMP*) é o responsável por estabelecer o processo através do qual dois dispositivos transferem informações de reconhecimento inicial que permitem a configuração e o controle do canal a ser estabelecido entre os dois dispositivos. Conforme [AUS00] o LMP negocia o tamanhos de pacotes a serem usados durante a transmissão de dados, trata dos modos de gerenciamento de energia, consumo de energia, e estados da conexão de um dispositivo em uma *piconet*. Ele

cuida também de aspectos de segurança, tratando da geração, troca e controle de chaves de *link* e chaves de criptografia usadas para autenticação e criptografia.

**Protocolo para Descoberta de Serviço:** esse protocolo (*Service Discovery Protocol, SDP*) permite que os serviços suportados por um dispositivo sejam conhecidos, o que é um passo inicial necessário antes que uma conexão entre dois dispositivos possa ocorrer. Conforme [AUS00] ele define como uma aplicação no dispositivo *cliente* deve proceder para descobrir os serviços disponíveis em um dispositivo Bluetooth *servidor* e suas respectivas características. O protocolo define como uma aplicação cliente pode pesquisar por serviço baseada em atributos específicos sem conhecimento prévio dos serviços disponíveis. O *SDP* fornece meios para a descoberta de novos serviços que ficam disponíveis quando o dispositivo cliente entra em uma área onde já tem um dispositivo Bluetooth operando (servidor). Ele também fornece funcionalidade para detectar quando um serviço não está mais disponível.

**Protocolo de Adaptação e Controle de *Link* Lógico:** durante um processo de conexão, esse protocolo (*Logical Link Control and Adaptation Protocol, L2CAP*) adaptará os protocolos de camada superior para a transmissão sobre a banda base. Portanto ele pode ser visto como que trabalhando em paralelo com *LMP* [HEL01]. *L2CAP* fornece serviços de dados orientados a conexão e não-orientados a conexão para os protocolos de camada superior [AUS00].

As quatro tarefas principais desse protocolo são:

- Multiplexação:

L2CAP suporte multiplexação de protocolos, uma vez que um grande número de protocolos (*SDP, RFCOMM, TCS Binary*, etc) podem operar sobre ele.

- Segmentação e Remontagem:

Pacotes de dados excedendo a Unidade Máxima de Transmissão (MTU), devem ser segmentados antes de serem transmitidos. E, de outro lado, remontados, antes de serem repassados para os protocolos de camada superior. L2CAP fornece suporte para protocolos e aplicações de mais alto nível transmitirem e receberem pacotes de dados de até 64 Kb de tamanho, uma vez que ele suporta datagramas IP (Internet Protocol).

- Qualidade de Serviço:

O estabelecimento de uma conexão L2CAP permite a troca de informações relativas a Qualidade de Serviço corrente para conexão entre os dois dispositivos Bluetooth.

- Grupos:

A especificação do protocolo L2CAP suporta uma abstração de *grupo* que permite implementações de mapeamento de grupos sobre uma *piconet*.

### **Protocolo de Substituição de Cabos**

Nesta camada o único protocolo é o *RFCOMM (Radio Frequency Communications Protocol)*. Este protocolo emula uma conexão serial RS-232 sobre a banda base Bluetooth. Ele permite a substituição de cabos seriais, razão pela qual esta camada recebe o nome de camada de protocolo de substituição de cabos. Ele também fornece capacidades de transporte para serviços de nível mais alto, como por exemplo *OBEX* que usa uma linha serial como mecanismo de transporte [AUS00].

### **Protocolos de Controle de Telefone**

Presentemente existem dois protocolos que se encaixam nessa camada: *Telephone Control Protocol–Binary (TCS\_BIN)* e *AT Command Set*. Ambos usam a emulação de porta serial (*RFCOMM*) para transmissão [HEL01] .

***TCS-BIN:*** é um protocolo orientado a bit que define a sinalização de controle de chamada para estabelecimento de chamadas de dados e voz entre dispositivos Bluetooth, além de procedimentos de gerenciamento de mobilidade para tratamento de grupos de dispositivos Bluetooth TCS.

***AT Command Set:*** o conjunto de comandos AT define a maneira pela qual um telefone móvel e um modem pode ser controlado.

### **Protocolos Adotados**

A quarta camada de protocolo, protocolos adotados, inclui uma mistura de diversos protocolos existentes que são suportados e foram designados para rodar sobre *RFCOMM*. Enquanto a maioria dos protocolos listados na Tabela 2.3 (*PPP, TCP/UDP, IP, OBEX, WAP, vCard, vCal, IrMC, WAE*) pode parecer familiar, alguns poucos merecem menção. Dentre os protocolos que merecem menção incluem-se *OBEX, vCard, e vCalendar (vCal)* [HEL01].

O protocolo **OBEX** representa um protocolo de sessão desenvolvido pela Infrared Data Association (IrDA) para a troca de objetos. OBEX usa o modelo cliente-servidor para a troca de objetos e é similar em funcionalidade ao HTTP (Hypertext Transmission Protocol), mas opera em um modo muito mais simples. OBEX também define uma pasta tipo lista de objetos que é usada para navegar no conteúdo das pastas do dispositivo remoto [AUS00].

Os protocolos **vCard** e **vCal** são especificações abertas controladas pelo *Internet Mail Consortium*. Ambas especificações definem o formato para troca eletrônica de cartão comercial e entradas de calendário pessoal e informações de organização e agenda. Essas especificações não definem mecanismos de transporte, mas apenas os formatos de dados para troca de informações. O transporte das informações nesses formatos é feito pelo **OBEX**.

Os demais protocolos dessa camada são padrões bem conhecidos no mercado e basicamente estão presentes nos cenários de uso do Bluetooth que envolvem o acesso aos recursos e serviços da Internet, em diversas maneiras possíveis, conforme já previstas nos modelos de uso definidos pelo Bluetooth SIG.

Através do uso desses protocolos já existentes, Bluetooth capitaliza anos de esforço anterior envolvendo o controle de modems, troca de informações de calendário, e execução de muitas funções eletrônicas adicionais, bem como acesso aos serviços disponíveis na Internet, permitindo que aplicações mais antigas também funcionem com a tecnologia Bluetooth, além de possibilitar que dispositivos com tecnologia Bluetooth (que é originariamente uma tecnologia para curta distância) possam acessar redes globais.

### **2.2.3. Estabelecendo uma Conexão de Rede**

Antes que uma conexão de rede possa ser estabelecida, um dispositivo compatível com Bluetooth deve estar ligado. Quando isso ocorre, a parte de comunicação do dispositivo estará em um modo de operação *standby*. Neste modo o dispositivo que não tem nenhuma conexão de rede estará periodicamente ouvindo por mensagens. O dispositivo estará monitorando o espectro de RF a cada 1,28 s, voltando sua atenção para um conjunto de 32 saltos de frequência que são definidos para aquele tipo de unidade (conforme [MIL01], a cada tipo de dispositivo Bluetooth é atribuído um grupo diferente de saltos de frequências; por exemplo, os telefones sem fio saltam entre um grupo de frequências diferente dos PDAs). Se um dispositivo Bluetooth requer comunicação com algum outro dispositivo, o método a seguir dependerá se o outro equipamento com o qual ele pretende se comunicar já tenha se comunicado previamente ou não. Se já, o endereço do outro dispositivo é conhecido, então

uma mensagem do tipo PAGE será transmitida. Se o endereço do outro dispositivo não foi obtido previamente, então uma mensagem INQUIRY será transmitida.

Conforme [MIL01], um dispositivo Bluetooth pode operar em qualquer dos dois estados principais: *Connection* e *Standby*. O dispositivo estará no estado *Connection* se ele está conectado ao outro dispositivo e envolvido em atividades correntes. Se o dispositivo não estiver conectado - ou se estiver conectado, mas não envolvido ativamente com outros dispositivos - então, ele automaticamente opera no estado *Standby*. A criação de um estado *Standby* foi concebida como uma maneira para economizar energia.

Prolongar a vida da bateria é uma questão fundamental para equipamentos portáteis, por isso Bluetooth oferece diferentes modos de operação de baixo consumo de energia. Assim, uma vez que um dispositivo Bluetooth deixa o estado *Standby* e entra no estado *Connection*, ele pode ser colocado em um dos quatro modos possíveis de operação de conexão, sendo os últimos três, modos de baixo consumo de energia, em três diferentes níveis, conforme descrito a seguir:

**Active mode:** um dispositivo Bluetooth está em modo *active* quando está participando ativamente na rede, transmitindo ou recebendo. As unidades ativas são automaticamente mantidas sincronizadas com a unidade mestre da rede.

**Sniff mode:** um dispositivo em modo *sniff* monitora a rede a uma taxa reduzida, diminuindo assim o seu consumo de energia. A taxa *sniff* é programável e varia de uma aplicação para outra.

**Hold mode:** esse modo de economia de energia é utilizado quando nenhum dado precisa ser transmitido. Quando um dispositivo é colocado pelo mestre em modo *hold* apenas seu *clock* interno permanece ativo, mas o dispositivo retém seu endereço de membro da rede. Esse é um modo popular para dispositivos de baixo consumo de energia com necessidades de transferência de dados relativamente simples, como por exemplo sensores de temperatura.

**Park mode:** esse modo é similar ao modo *hold*, na medida em que o dispositivo permanece sincronizado com o dispositivo mestre da rede, porém ele não retém seu endereço, deixando de ser um membro ativo.

As necessidades de energia diminuem a medida que o dispositivo vai de *sniff* para *hold* e para *park mode*. Mas deve-se notar também que tempo para retornar para um estado ativo na rede Bluetooth é geralmente inversamente proporcional ao modo de operação de energia de um dispositivo [HEL01]. Isto é, quando operando em *sniff mode*, o dispositivo

está ouvindo por transmissão e pode responder mais rápido do que quando ele está em um modo de energia diferente.

### As Piconets

Quando dois dispositivos Bluetooth estabelecem uma conexão, eles criam um tipo de rede pessoal denominada *piconet*. Cada *piconet* pode conter até oito dispositivos Bluetooth diferentes. Pode-se dizer, portanto, que [BHA01] *piconet* é um conjunto de dispositivos Bluetooth que compartilham um mesmo canal.

Dentro de cada *piconet*, um dispositivo serve como o mestre (*master*), enquanto os outros sete dispositivos funcionam como escravos (*slaves*), apresentando, portanto, uma configuração em estrela. Qualquer dispositivo individual pode pertencer, simultaneamente, a diversas *piconets*. A figura 2.4 mostra uma *piconet* típica.

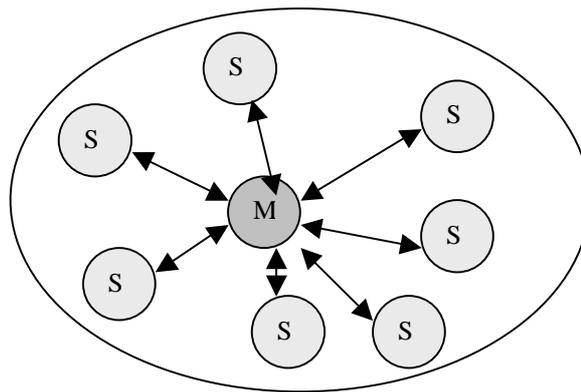


Figura 2.4: Exemplo de uma *piconet* [MIL01]

Não há nenhuma diferença de hardware ou software entre um dispositivo mestre e um escravo, portanto qualquer dispositivo pode ser um mestre. O dispositivo que estabelece a *piconet* torna-se o dispositivo mestre [AUS00]. Os papéis em uma *piconet* podem mudar, mas nunca pode haver mais de um mestre.

A dispositivo exercendo o papel de mestre controla todo o tráfego numa *piconet*. Ele aloca capacidade para os *links* síncronos (*SCO*) e gerencia um esquema de *polling* para os *links* assíncronos (*ACL*). Dispositivos escravos somente podem enviar dados no *slot* escravo-para-mestre depois de terem sido endereçados no precedente *slot* mestre-para-escravo. Se um mestre não tem informação para enviar no *slot* mestre-para-escravo, um pacote contendo

somente o *header* e o código de acesso é enviado. Ou seja, cada dispositivo escravo é endereçado em uma ordem específica, num esquema de polling, e pode enviar dados somente após ter sido endereçado. Desse modo, é eliminada qualquer possibilidade de colisão de pacotes sendo enviados por diferentes dispositivos escravos .

Todos os dispositivos em uma *piconet* compartilham o mesmo canal de salto de frequência, que é estabelecido na medida em que os *escravos* sincronizam os seus *clocks* internos ao *clock* da unidade *mestre* [MIL01]. Isto permite que todas as unidades em uma *piconet* saltem de frequência para frequência na mesma seqüência - e estabelece uma identidade única para essa *piconet*. Como *piconets* diferentes têm identidades diferentes baseadas em canais de salto de frequência diferentes, diversas *piconets* podem compartilhar o mesmo espaço físico sem interferir entre si.

Até sete *escravos* podem estar ativos e sendo atendidos simultaneamente pelo *mestre*. Se o dispositivo *mestre* necessita se comunicar com mais do que 7 dispositivos, ele poderá fazê-lo desde que primeiro instrua outros dispositivos *escravos* ativos para que comutem para o modo *park* de operação em baixa energia, e então poderá convidar outros dispositivos em modo *park* para tornarem-se ativos na *piconet*. Esse procedimento pode ser repetido, o que permite ao *mestre* atender um grande número de *escravos*. Na verdade, uma mesma *piconet* poderá ter em teoria até um máximo de 255 dispositivos em modo *park* [BHA01].

A maioria das aplicações Bluetooth imaginadas envolvem a comunicação local entre pequenos grupos de dispositivos. Uma configuração de *piconet* consistindo de dois, três, ou até oito dispositivos é idealmente adaptada para atender às necessidades de comunicação de tais aplicações. Quando muitos grupos de dispositivos necessitam estar ativos simultaneamente, cada grupo pode formar uma *piconet* separada. Os nós escravos em cada *piconet* permanecem sincronizados com o clock do mestre e saltam de acordo com a seqüência de salto de canal que é função do endereço do nó do mestre. Uma vez que as seqüências de salto de canal são pseudo-randômicas, a probabilidade de colisão entre *piconets* é pequena. Desse modo, *piconets* que compartilham a mesma área geográfica podem coexistir e operarem independentemente. Entretanto, quando o grau de compartilhamento é muito elevado, a performance de cada *piconet* começa a degradar.

Em alguns cenários de uso, entretanto, dispositivos de diferentes *piconets* podem necessitar comunicar-se uns com os outros. Bluetooth define a estrutura chamada de *scatternet* (redes de difusão) para facilitar a comunicação entre *piconets*. Como pode ser visto

na figura 2.5, as conexões são formadas por *bridge nodes*, que são membros de duas ou mais *piconets*.

Um *bridge node* participa em cada *piconet* em um esquema de divisão de tempo. Depois de permanecer em uma *piconet* por algum tempo, um dispositivo *bridge* pode mudar para outra *piconet* comutando para a sua correspondente seqüência de salto. Passando por todos os membros das *piconets*, o *bridge node* pode enviar e receber pacotes em cada *piconet* e também encaminhar pacotes de uma *piconet* para outra.

Um *bridge node* pode ser um escravo em ambas *piconets*, ou ser um escravo em uma e um mestre em outra. Por exemplo, considere um salão cheio de pessoas, onde cada pessoa tem um telefone celular e um *headset* sem fio. Quando usuários falam com seus *headsets*, somente os telefones celulares correspondentes aos seus *headsets* deveriam receber o sinal. Neste exemplo, cada par de *headset* e telefone celular constituem uma *piconet* separada. Agora suponha que esses usuários também querem enviar mensagens de textos de seus telefones celulares uns aos outros. Isto será possível somente se todas as *piconets* são interconectadas para formar uma grande *scatternet* (rede de dispersão). As técnicas para a formação de *scatternets* estão ainda sob desenvolvimento.

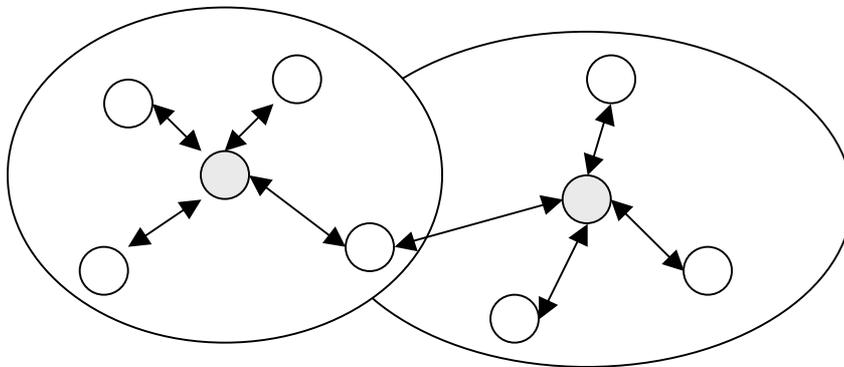


Figura 2.5: Duas *piconets* formando uma *scatternet*

### ***Inquiry e Paging***

Conforme [BHA01], Bluetooth usa um procedimento conhecido como *inquiry* para descobrir outros dispositivos, e *paging* para subseqüentemente estabelecer conexões com eles. Tanto *inquiry* quanto *paging* são procedimentos assimétricos. Em outras palavras, isto significa que o dispositivo que faz o *inquiry* e o que recebe o *inquiry* (ou *paging* e *paged*) devem executar diferentes ações. Isto implica que quando dois nós estabelecem uma conexão,

cada um deles necessita começar de um diferente estado inicial; caso contrário, eles nunca descobririam um ao outro. As especificações de perfis desempenham importante papel aqui, definindo o estado inicial requerido para cada dispositivo em todos os cenários de uso. Um procedimento simétrico para estabelecimento de conexões é ainda um tópico de pesquisa.

Conceitualmente as operações *inquiry* e *paging* são simples, mas a característica de salto de frequência na camada física torna os detalhes de baixo nível bastante complexos. Dois nós não podem trocar mensagens até que eles tenham concordado quanto a seqüência comum de salto de canal, bem como a correta fase dentro da seqüência escolhida. Bluetooth resolve esse problema simplesmente determinando o uso de uma seqüência de salto para *inquiry* bem conhecida de todos os dispositivos. Durante o *inquiry*, ambos os nós (um é o ouvinte e o outro o transmissor) saltam usando a mesma seqüência; mas o transmissor salta mais rápido do que o ouvinte, transmitindo um sinal em cada canal e ouvindo entre as transmissões por uma resposta. Quando mais do que um ouvinte está presente, suas respostas podem colidir. Para evitar colisão, ouvintes retardam suas respostas até expirar um tempo de espera aleatória. Finalmente o dispositivo transmissor coleta algumas informações básicas de seus ouvintes, tais como endereço de dispositivo e compensação de *clock*. Estas informações serão subseqüentemente usadas para a operação de *paging* com o dispositivo ouvinte selecionado.

Os passos de comunicação durante o procedimento de *paging* são similares, exceto que a mensagem de *paging* é do tipo *unicast* para um ouvinte selecionado, portanto o ouvinte não necessita esperar um tempo aleatório para responder. O transmissor também tem uma melhor estimativa do *clock* do ouvinte, o que o possibilita se comunicar com o ouvinte quase que instantaneamente. Tão logo receba um *ACK* para a mensagem *paging*, o transmissor torna-se o mestre e o ouvinte torna-se o escravo da *piconet* que acaba de se formar, e ambos os nós mudam para a seqüência de salto de canal da *piconet*. Mais tarde, se necessário, os papéis de mestre e escravo podem ser trocados.

Os passos para admitir um novo escravo em uma *piconet* existente são ligeiramente mais complexos. O mestre pode tanto começar descobrindo novos nós em sua vizinhança e convidá-los para juntar-se à *piconet* ou, ao invés disso, esperar em estado de *scan* (ouvindo) para ser descoberto por outros nós. Com ambas as opções, a comunicação na *piconet* original deve ser suspensa pela duração do processo de *inquiry* e *paging*. A latência para admitir o novo nó em uma *piconet* pode ser grande se o mestre não muda para o modo *inquiry* ou *scan*

com frequência. Esta latência pode ser reduzida somente ao custo de alguma perda de capacidade para a *piconet*. O estudo desse custo-benefício é outro tópico que está em pesquisa.

#### 2.2.4. Recursos de Segurança

Segurança é uma questão importante na especificação Bluetooth. Afinal, certamente ninguém gostaria de usar um dispositivo Bluetooth sabendo que outros dispositivos do mesmo tipo eventualmente existentes nas proximidades poderiam estar obtendo seus dados sem permissão, ou ainda que uma terceira pessoa poderia estar ouvindo sua conversação e vendo suas mensagens.

Bluetooth inclui suporte para autenticação e criptografia. Essas duas funções de segurança são baseadas no uso de uma chave de *link* secreta que é compartilhada por um par de dispositivos [HEL01]. Esta chave secreta de *link* é gerada por um procedimento duplo quando dois dispositivos compatíveis com Bluetooth se comunicam pela primeira vez.

#### Segurança Básica

Existem três modos possíveis de segurança para um dispositivo Bluetooth: [MIL01]

- Modo de segurança 1:

Nesse modo, nenhuma medida de segurança é implementada. O dispositivo é efetivamente inseguro.

- Modo de segurança 2:

Referido como segurança estabelecida no nível de serviço. Quando em modo de segurança 2, o dispositivo iniciará procedimentos de segurança após o estabelecimento da conexão. Este modo de segurança fornece a possibilidade de as aplicações terem diferentes políticas de acesso e permite suporte para rodar aplicações com diferentes requerimentos de segurança em paralelo [HEL01].

- Modo de segurança 3:

Referido como segurança estabelecida no nível do *link*. Quando neste modo de segurança, o dispositivo inicia os procedimentos de segurança antes de completar os procedimentos de estabelecimento de conexão.

A arquitetura de segurança usada pelo Bluetooth é bastante flexível, definindo a metodologia para autenticação e criptografia para o protocolo específico do Bluetooth, enquanto permite que protocolos não-específicos do Bluetooth que são transportados via

Bluetooth possam ter suas próprias funções de segurança. Deve-se observar que a autenticação é fornecida usando um sistema de desafio-resposta, com uma conexão particular especificada para solicitar tanto uma via, via dupla, ou nenhuma autenticação. Considerando o método de autenticação construído no Bluetooth, ele somente autentica o dispositivo, e não seu usuário. Isso significa que os usuários de equipamento devem considerar o uso de um programa de segurança na camada de aplicação, ou tomarem cuidado para que equipamentos compatíveis com Bluetooth não caiam nas mãos de terceiros [HEL01].

Embora autenticação seja suportada com base em uma chave de *link* armazenada, a arquitetura de segurança também permite que a autenticação ocorra pela formação de pares, através da entrada de um número pessoal de identificação (PIN). Autenticação é baseada no relacionamento confiável entre dois dispositivos. Isto é, um dispositivo confiável é aquele que foi autenticado previamente, ao passo que o dispositivo não confiável é aquele que não foi autenticado previamente ou para o qual nenhuma informação de segurança está disponível. Durante a preparação inicial de comunicação entre dispositivos Bluetooth, um relacionamento confiável será estabelecido. Também durante a preparação inicial, o nível de segurança é determinado baseado na necessidade para autenticação, autorização, e criptografia. Se uma necessidade para autenticação é determinada, o processo de autenticação entre dispositivos deverá ocorrer. Isso será seguido pelos processos de autorização e criptografia, se cada um deles é requerido. Uma vez que o módulo de segurança complete seu trabalho, o acesso é garantido entre os dispositivos. Observe que sob o módulo de segurança Bluetooth, um usuário de dispositivo pode configurar seu PDA, telefone celular, ou dispositivo similar compatível com Bluetooth para restringir comunicação para certos dispositivos, tal como, somente entre os produtos que o usuário tem, formando assim um grupo de usuário fechado [HEL01].

### **Gerenciamento de Chaves**

Conforme [MIL01], o gerenciamento de chaves do Bluetooth funciona utilizando três tipos básicos de chaves:

**Código PIN (*PIN Code*):** o número de identificação pessoal (PIN) é selecionado pelo usuário e deve ser um número de 48 bits.

**Chave de *link* particular (*Private Link Key*):** um dispositivo Bluetooth pode utilizar um dos quatro tipos diferentes de chave de *link*, também denominada chaves de autenticação.

Todas essas chaves são números aleatórios de 128 bits temporários ou semipermanentes, gerados na hora de cada transmissão. Uma chave de unidade é derivada por um único dispositivo Bluetooth. Uma chave de combinação é derivada de um par de dispositivos e é mais segura do que uma chave de unidade. Uma chave mestra é usada quando um dispositivo mestre em uma *piconet* deseja transmitir para vários dispositivos ao mesmo tempo e substitui a chave de *link* atual por uma de sessão. Finalmente, uma chave de inicialização é utilizada no processo de inicialização do dispositivo e protege os parâmetros de inicialização quando eles são transmitidos.

**Chave de criptografia particular (*Private Encryption Key*):** a chave de criptografia é derivada da chave de *link* atualmente em uso. Toda vez que a criptografia é necessária, a chave de criptografia é alterada. A chave de criptografia pode variar entre 8 e 128 bits de extensão. Essa variação em extensão é necessária para se adaptar a legislação de exportação de vários países.

Além disso, cada dispositivo Bluetooth individual tem seu próprio endereço de dispositivo exclusivo de 48 bits, atribuído pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). As várias chaves, juntamente com o endereço do dispositivo, são usadas para gerar outras chaves “secretas” para cada *link* na conexão, para garantir que outros dispositivos Bluetooth (dentro ou fora da *piconet* atual do dispositivo) não possam monitorar secretamente uma conexão Bluetooth.

O Gerenciamento de Chave Bluetooth utiliza esses três tipos de chaves no processo de controle de chave. O processo funciona mais ou menos assim:

- 1- O usuário (ou o dispositivo) digita uma senha numérica.
- 2- O dispositivo gera uma chave de *link* particular e autentica com o segundo dispositivo.
- 3- O dispositivo deriva uma chave de criptografia particular a partir da chave de *link* e, em seguida, autêntica com o segundo dispositivo.

Como ilustrado na figura 2.6, se todas as chaves se corresponderem, os dois dispositivos serão conectados. Senão, a conexão será abortada.



Figura 2.6: A segurança de controle de chave entre dois dispositivos [MIL01]

### Autenticação de dispositivo

Além do esquema de segurança de controle de dispositivo, a especificação Bluetooth também define um esquema de autenticação. Isso é essencialmente um esquema de "desafio e resposta", onde um protocolo de segurança especial é usado para verificar se o outro dispositivo reconhece uma chave secreta compartilhada (denominada "chave simétrica"). Se os dois dispositivos reconhecerem a mesma chave, a autenticação será bem sucedida; se qualquer um dos dispositivos não reconhecer a chave, a conexão será abortada.

Qual o dispositivo que enviará a mensagem "desafio" será determinado pela aplicação Bluetooth específica; não é necessariamente o dispositivo mestre que começa o processo. Algumas aplicações exigem autenticação apenas em um sentido, enquanto outras podem exigir autenticação mútua. Se autenticação falhar haverá um tempo de espera a ser guardado antes de uma nova tentativa de autenticação ser feita.

### Criptografia de pacotes

A especificação Bluetooth requer uma criptografia sistemática de cada pacote que é transmitido. Há três modos de criptografia definidos:

- Modo de criptografia 1 - nesse modo, nenhum pacote é criptografado.
- Modo de criptografia 2 - nesse modo, o tráfego ponto-a-ponto é criptografado, mas o tráfego ponto-a-multiponto não é.
- Modo de criptografia 3 - nesse modo todo o tráfego é criptografado.

Apesar de todas essas medidas de segurança previstas na especificação Bluetooth, ainda assim há quem sustente que a tecnologia Bluetooth não é segura. Entretanto, isso não impede que a mesma seja utilizada em muitas aplicações úteis. E recursos adicionais de segurança podem ser incluídos na camada de aplicação.

### 2.3. Os Modelos de Uso e Perfis

Conforme [MIL01], um *modelo de uso Bluetooth* é simplesmente uma descrição de uma possível aplicação da tecnologia sem fio Bluetooth. Os modelos de uso Bluetooth não são técnicos, são na verdade uma descrição de tarefas específicas que os consumidores poderiam realizar com dispositivos Bluetooth em vários cenários potenciais de aplicação.

O *perfil Bluetooth* é a descrição técnica de como implementar um determinado modelo de uso. Ou seja, um perfil define em detalhes os procedimentos, parâmetros, características e protocolos necessários para implementar uma aplicação específica do modelo de uso.

Para garantir a interoperabilidade entre aplicações Bluetooth construídas por diferentes fornecedores, o Bluetooth SIG definiu previamente diversos modelos de uso e seus respectivos perfis. A expectativa é de que as implementações feitas com base nesses perfis sejam interoperáveis. A autoridade de certificação do Bluetooth usa esses perfis para testar e certificar a aderência, e permite o uso da marca Bluetooth somente para produtos que estão em conformidade com os métodos e procedimentos definidos nos perfis [BHA01].

Atualmente estão definidos 13 diferentes modelos de uso e perfis, baseados na versão 1.1 da especificação Bluetooth. Novos modelos de uso são visualizados para versão 2.0 da especificação Bluetooth e estão ainda em fase de desenvolvimento. A seguir são listados os atuais modelos de uso:

**Desktop Sem Fio** - descreve como conectar qualquer tipo de periférico ao seu computador de mesa ou portátil, sem precisar usar cabos.

**Conexão Internet (*Internet Bridge*)** - descreve como um dispositivo Bluetooth poderá se conectar a Internet, quer seja através de uma conexão discada ou de uma conexão por rede local.

**Acesso à LAN** - descreve como conectar um dispositivo sem fio Bluetooth a uma rede local tradicional e usar os serviços disponíveis na rede.

**Transferência de Arquivo** - descreve genericamente como transferir arquivos de dados de um dispositivo Bluetooth para outro. A transferência de arquivos pode ser manual ou automática. É possível também pesquisar o conteúdo de pastas de arquivos em dispositivos remotos.

**Mensagem Proibida** - permite que mensagens de correio eletrônico sejam compostas em locais onde anteriormente isso era proibido, e depois, quando o usuário estiver passando

por uma área servida pela tecnologia Bluetooth, seu PDA ou laptop se conecta e sincroniza automaticamente com uma rede Bluetooth e envia suas mensagens ao destino.

**Briefcase Trick** - de modo semelhante ao modelo anterior, permite que um notebook, mesmo guardado em sua pasta, possa periodicamente despertar e receber mensagens de correio eletrônico que estejam chegando, e em seguida, alertar o seu usuário através do seu telefone (também Bluetooth). Este poderá ainda, se quiser, consultar mensagens selecionadas da lista recebida pelo telefone.

**Conferência Interativa** - descreve como os participantes de uma reunião ou conferência, conectados por meio da tecnologia sem fio Bluetooth, podem trocar dados entre si, bem como controlar o PC e o equipamento de projeção.

**Sincronização automática** - a principal aplicação para esse modelo é o recurso de sincronização automática, em segundo plano, entre vários dispositivos (incluindo computadores de mesa, computadores portáteis, PDAs, telefones móveis) de diversos tipos de itens, tais como, catálogos de endereços, listas de contato, calendários, agendas e assim por diante.

**Cartão Postal Imediato** - também chamado *Internet Postcard*, descreve como conectar uma câmara fotográfica digital ou uma câmera de vídeo digital a um notebook e retransmitir fotografias e filmes por meio da Internet.

**Telefone 3 em 1:** o telefone três-em-um é um único *headset* que pode se conectar a três tipos diferentes de provedores: à rede telefônica pública, como um telefone sem fio; à uma rede de telefone celular; a outros telefones, como um tipo de "walkie-talkie" ou extensão do *headset*

**Headset Principal (Ultimate Headset):** nesse modelo o usuário conecta um *headset* a um aparelho celular ou estação base sem fio, mantendo a privacidade da chamada. Esse modelo de uso também visualiza a utilização do *headset* sem fio para se conectar ao computador pessoal, para entrada e saída de áudio.

**Telefone PC (Pc Speaker Phone):** esse modelo é uma extensão do anterior. Ele permite a conexão, sem fio, do telefone ao PC portátil ou de mesa e utilizar o alto-falante interno do computador como um viva-voz para chamadas de conversações em grupo.

**Kit Viva-Voz para Carro (Hands-Free Car Kit):** esse modelo permite o uso de um *headset* com um kit viva-voz para telefone celular, porém substituindo os fios e cabos por uma conexão Bluetooth.

## 2.4. Compreendendo e Organizando os Perfis

Como foi visto anteriormente, os perfis Bluetooth definem os procedimentos e protocolos necessários para implementar uma aplicação específica ou modelo de uso. Todos os perfis são criados com base em uma camada principal de protocolos comuns, sobre a qual são colocadas camadas de protocolos específicos necessários para uma determinada aplicação ou modelo de uso.

Além de identificar protocolos, cada perfil define também procedimentos e mensagens que devem (ou podem) ser usadas para implementar uma aplicação específica. Assim, cada procedimento é identificado como sendo obrigatório, opcional, condicional, excludente ou não aplicável ao perfil atual.

Conforme [MIL01], os 13 perfis da versão 1.1 da especificação Bluetooth podem ser organizados em cinco grupos gerais:

### **Genérico (*Generic*)**

Perfil de Acesso Genérico (*Generic Access Profile, GAP*)

Perfil de Aplicação para Descoberta de Serviço (*Service Discovery Application Profile, SDAP*)

### **Porta Serial (*Serial Port*)**

Perfil de Porta Serial (*Serial Port Profile, SPP*)

Perfil de Troca Genérica de Objetos (*General Object Exchange Profile, GOEP*)

### **Telefonia (*Telephony*)**

Perfil de Telefonia Sem Fio (*Cordless Telephony Profile, CTP*)

Perfil *Intercom* (*Intercom Profile IntP*)

Perfil de *Headset* (*Headset Profile, HSP*)

### **Rede (*Networking*)**

Perfil de Acesso à LAN (*LAN Access Profile, LAP*)

Perfil de Acesso Discado à Rede (*Dial-Up Networking Profile, DUNP*)

Perfil de Fax (*Fax Profile, FaxP*)

### **Troca de Objetos (*Object Exchange*)**

Perfil de Transferência de Arquivos (*File Transfer Profile, FP*)

Perfil de Sincronização (*Synchronization Profile, SP*)

Perfil de Envio de Objetos (*Object Push Profile, OPP*)

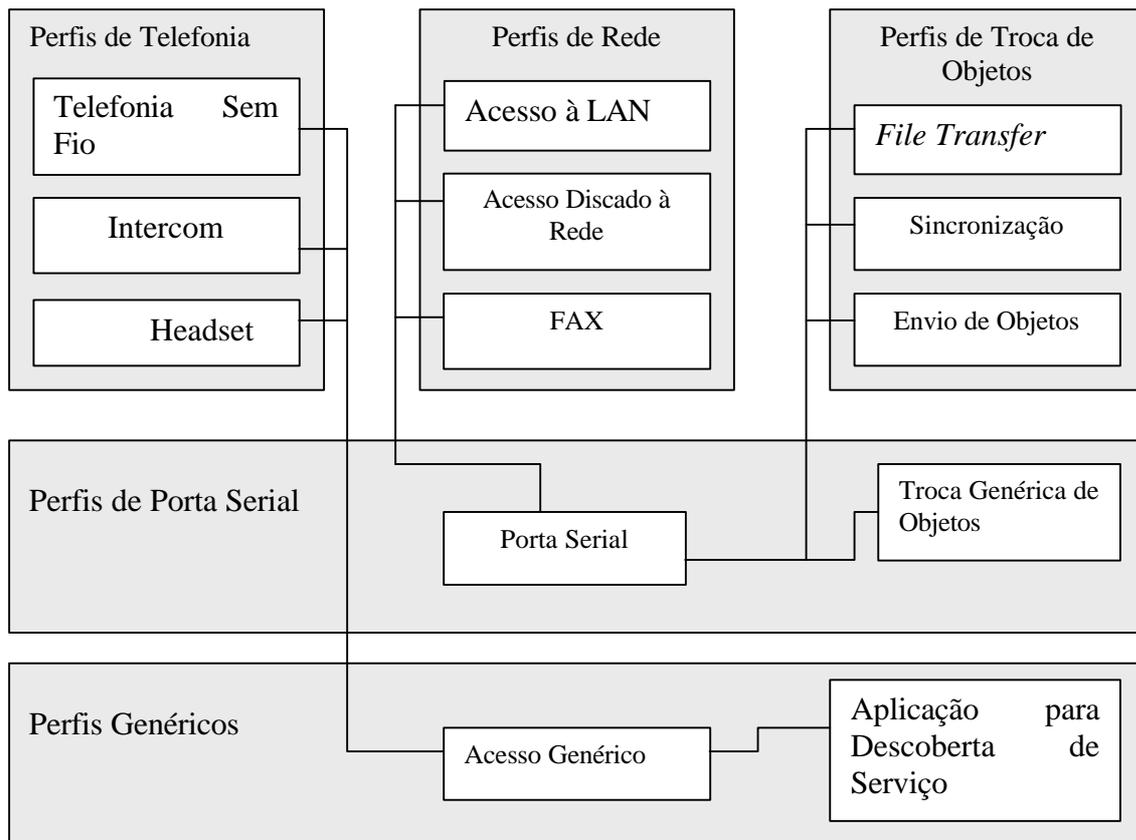


Figura 2.7: Família de Perfis Bluetooth

### 2.4.1 Perfis Genéricos

De acordo com [MIL01], os dois primeiros perfis Bluetooth são denominados perfis genéricos, porque eles são essenciais para todas as formas de comunicação da tecnologia Bluetooth. Eles provavelmente serão implementados em todos os dispositivos compatíveis com a tecnologia Bluetooth.

#### Perfil de Acesso Genérico, *GAP*

O Perfil de Acesso Genérico (*Generic Access Profile*) define como duas unidades Bluetooth descobrem uma à outra e estabelecem uma conexão entre si. O *GAP* define modos e procedimentos que são genéricos e podem ser usados por outros perfis. Essencialmente, o *GAP* é a base sobre a qual todos os outros perfis são criados. Ele abrange principalmente três tipos de itens: **dicionário** (uma coleção de termos e suas definições, de maneira que todos os fabricantes utilizem a mesma terminologia), **conectividade** (operações que permitem a um dispositivo Bluetooth se conectar a outros dispositivos e se autenticar com eles) e

**personalização** (elementos que identificam e personalizam dispositivos individuais Bluetooth).

As funções a seguir estão definidas no *GAP*:

**Classe do dispositivo** (*Device Class*). O *GAP* define o tipo de dispositivo e os tipos de serviços suportados por aquele tipo de dispositivo.

**Nome do dispositivo** (*Device Name*). O *GAP* permite que os dispositivos tenham nomes amigáveis para os usuários, com até 248 bytes de extensão – embora alguns dispositivos Bluetooth, por causa de limitações de exibição, possam não ser capazes de exibir o nome todo.

**Código secreto PIN Bluetooth** (*Bluetooth PIN*). O *GAP* estabelece que um número de identificação pessoal (PIN) pode ser digitado pelo usuário do dispositivo, para ser usado em processos de autenticação.

**Modos de descoberta** (*Discovery Modes*). O *GAP* define três diferentes modos para detectar dispositivo: *detectável genérico* (permanentemente disponível para outros dispositivos), *detectável restrito* (disponível apenas por um período limitado de tempo ou sob condições específicas) e *não detectável* (não disponível para outros dispositivos).

**Modos de paridade** (*Pairing Modes*). A paridade é um procedimento de inicialização onde dois dispositivos estabelecem uma chave de *link* comum para autenticação subsequente. Existem dois modos diferentes de paridade, *com paridade* (aceita conexão) ou *sem paridade* (não aceita conexão).

**Modos de segurança** (*Security Modes*). O *GAP* define três modos diferentes de segurança para dispositivos Bluetooth, o *modo de segurança 1* (não restringe a segurança), o *modo de segurança 2* (restrição de segurança na camada L2CAP) e o *modo de segurança 3* (restrição de segurança na camada Link).

**Procedimentos do modo ocioso** (*Idle mode procedures*). O *GAP* define vários procedimentos de modo ocioso para dispositivos Bluetooth, incluindo o *consulta genérica* (fornece endereço do dispositivo, relógio, classe e o modo digitalizar página de dispositivos detectáveis genéricos), *consulta limitada* (fornece as mesmas informações de dispositivos detectáveis restritos), *detecção de nome* (fornece apenas o nome do dispositivo) e *detecção de dispositivo* (fornece o endereço, relógio, classe, modo digitalizar página e o nome do dispositivo).

**Vinculação (Bonding).** O *GAP* fornece dois tipos de relacionamento entre dispositivos Bluetooth, baseados em uma chave de *link* comum (denominada *vínculo*) que são: *vinculação dedicada* (os dispositivos criam e trocam uma chave de *link* comum e nenhuma outra informação) e *vinculação genérica* (os dispositivos examinam todos os canais e procedimentos de estabelecimento de conexão).

**Procedimentos de estabelecimento (Establishment Procedures).** O *GAP* define os procedimentos necessários para estabelecer *links*, *canais* e *conexões* entre dois dispositivos Bluetooth.

A conformidade com este perfil garante que qualquer par de dispositivos Bluetooth, independente de qual sejam os seus fabricantes, possam trocar informações via Bluetooth para descobrir que tipo de aplicações os dispositivos suportam.

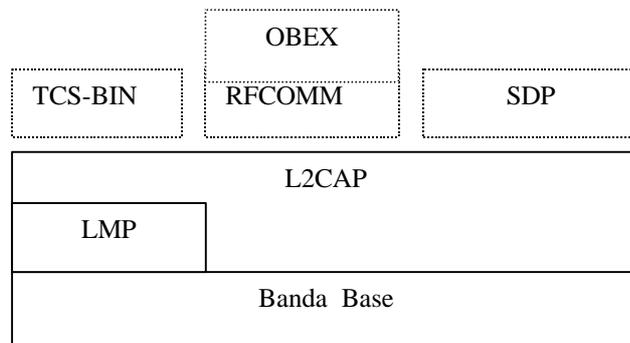


Figura 2.8: A pilha de protocolos para o Perfil de Acesso Genérico

### **Perfil de Aplicação para Descoberta de Serviço, *SDAP***

Esse perfil (*Service Discovery Application Profile*) define um método padrão para a detecção de serviços disponíveis em uma outra unidade Bluetooth. A detecção de serviço é o processo pelo qual os dispositivos Bluetooth podem localizar, recuperar determinadas informações e fazer uso de serviços registrados em outros dispositivos Bluetooth. O perfil trata da pesquisa por serviços específicos bem conhecidos e também da pesquisa por serviços genéricos [AUS00].

O *SDAP* envolve a utilização de uma aplicação de usuário, a aplicação de detecção de serviço, que é requerida na unidade Bluetooth que deseja localizar serviços. Essa aplicação faz uso do Protocolo de Descoberta de Serviço (*SDP, Service Discovery Protocol*) para enviar e receber requisições de serviço de outras unidades Bluetooth. Portanto, o *SDAP* descreve

como o protocolo SDP deve ser usado dentro de uma aplicação e como essa aplicação deve se comportar durante o processo de detecção de serviço.

Na terminologia Bluetooth, um dispositivo pode ser *local* ou remoto. O dispositivo que inicia o processo de detecção de serviço é rotulado como o dispositivo local; o dispositivo que responde às consultas de serviço é o dispositivo remoto. Esse processo coloca o dispositivo local no papel de “cliente”, considerando-se um processo cliente/servidor, enquanto que o dispositivo remoto (carregado com as informações de "serviços" relativas às consultas do dispositivo iniciante), executa o papel de servidor. O resultado é que a pilha de protocolos do dispositivo local é ligeiramente diferente da pilha de protocolos do dispositivo remoto. Apenas o dispositivo local ou cliente, utiliza a aplicação SDAP [MIL01].

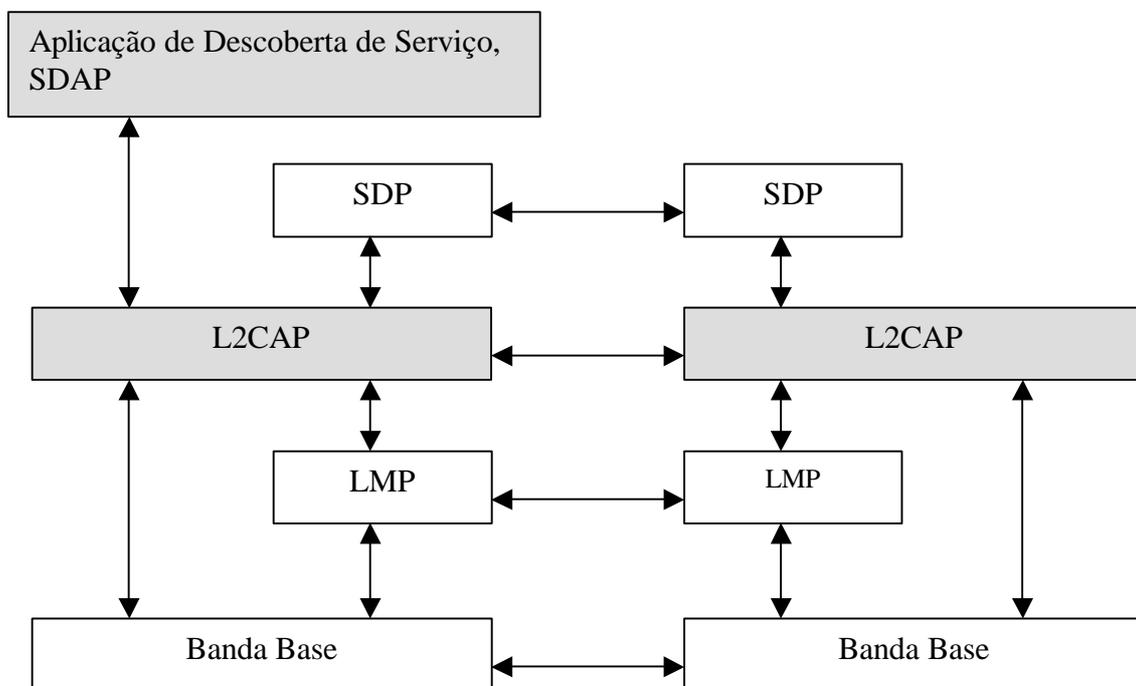


Figura 2.9: Pilhas de protocolo local e remoto para o perfil *SDAP*

### Perfil de Porta Serial, *SPP*

O Perfil de Porta Serial (*Serial Port Profile*) define como estabelecer portas seriais virtuais em dois dispositivos e conectá-los usando Bluetooth. Usando esse perfil pode-se prover um dispositivo Bluetooth com a capacidade de emulação de um cabo serial com sinalização de controle RS-232, que é uma interface padrão comum para equipamentos de

comunicação de dados. Esse perfil garante que taxas de transmissão de dados até 128 Kbits/s possam ser utilizadas [AUS00].

Esse perfil utiliza os protocolos RFCOMM, SDP, L2CAP, LMP e Banda Base. Um componente importante é o protocolo RFCOMM, que é um protocolo de transporte simples que emula a porta serial RS-232, sendo utilizado para transportar dados do usuário, sinais de controle do modem e comandos de configuração em geral[MIL01].

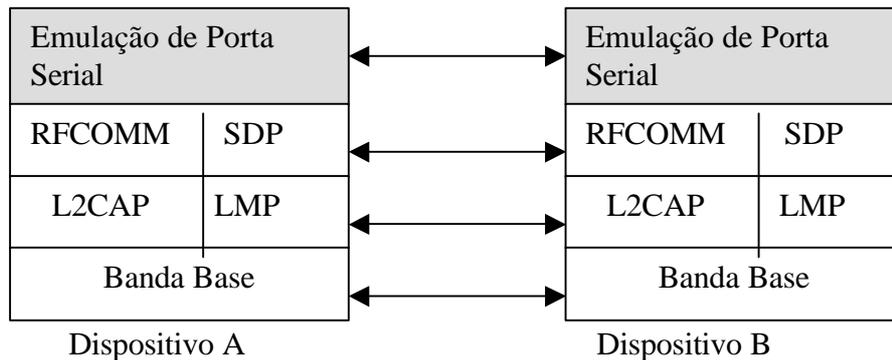


Figura 2.10: As pilhas de protocolos do Perfil de Porta Serial

### Perfil de Troca Genérica de Objetos, *GOEP*

O Perfil de Troca Genérica de Objetos (*Generic Object Exchange Profile*) define o conjunto de protocolos e procedimentos a serem usados por aplicações que tratam a troca de objetos. Diversos modelos de uso são baseados nesse perfil, como por exemplo, *Transferência de Arquivos* e *Sincronização*. Típicas unidades Bluetooth usando esse perfil são notebooks, PDAs, telefones celulares e telefones inteligentes [AUS00].

Aplicações usando o perfil *GOEP* assumem que os *links* e canais estão estabelecidos, conforme definido pelo *GAP*. O perfil descreve os procedimentos para o envio de dados de um dispositivo Bluetooth para outro, e também como extrair dados de outros dispositivos. O *GOEP* é dependente do perfil de *Porta Serial*, pois a maioria das transferências de dados envolvendo dispositivos de computação normalmente utiliza uma conexão serial RS-232.

Conforme [MIL01] o *GOEP* utiliza os seguintes protocolos: *OBEX*, *RFCOMM*, *SDP*, *L2CAP*, *LMP* e Banda Base. Esse perfil, a exemplo do *SDAP*, opera em um modelo cliente/servidor. O dispositivo que inicia a conexão é definido como cliente, enquanto que o outro dispositivo é identificado como servidor. Após essa relação ter sido estabelecida, o *GOEP* fornece três recursos operacionais principais:

**Estabelecer uma sessão OBEX** - utilizado para estabelecer uma sessão *Object Exchange* entre um dispositivo servidor e um dispositivo cliente.

**Enviar um objeto de dados** - utilizado quando os dados necessitam ser transferidos do dispositivo servidor para o dispositivo cliente.

**Recuperar um objeto de dados** - utilizado quando os dados necessitam fluir em outra direção, ou seja, serem transferidos do dispositivo cliente para o dispositivo servidor.

Os dispositivos cliente e servidor compartilham a mesma pilha de protocolos, conforme pode ser observado na figura seguir.

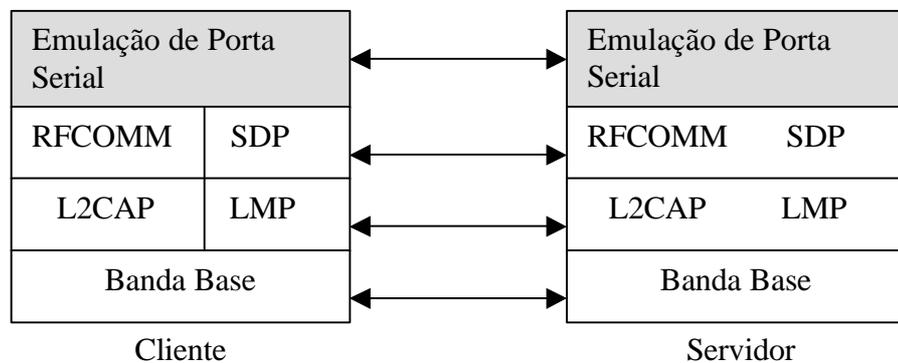


Figura 2.11: A pilha de protocolos do Perfil de Troca Genérica de Objetos

#### 2.4.2. Os Perfis de Telefonia

Os perfis desse grupo foram definidos para atender funções de telefonia em geral. Com exceção do perfil de Fax, todos esses perfis incorporam a transmissão de sinais de voz [MIL01].

##### Telefonia Sem Fio, CTP

Esse perfil (Cordless Telephony Profile) foi desenvolvido especificamente para implementar parte do modelo de uso do telefone três-em-um (o outro componente do telefone três-em-um é implementado no perfil Intercom). Esse perfil permite que um *handset* sem fio seja usado para fazer chamadas por meio de uma estação-base de voz para a rede pública de telefonia (seu provedor de serviço de telefonia local) e se conectar diretamente a uma rede de telefonia celular.

O CTP utiliza os seguintes protocolos: *TCS-BIN*, *SDP*, *L2CAP*, *LMP* e Banda Base. A figura 2.12 mostra a pilha de protocolos exigida para o CTP, que é exatamente a mesma pilha de protocolos utilizada pelo perfil Intercom.

Os dispositivos que implementam telefonia sem fio podem fazer uso dos seguintes recursos definidos pelo *CTP*:

- **Apresentação da identificação da chamada:** permite que o usuário veja o número que está chamando antes de atender a chamada.
- **Informações da chamada:** permite que o dispositivo forneça informações adicionais sobre a chamada enquanto ela estiver em andamento, como, por exemplo, a duração da chamada.
- **Gerenciamento da conexão:** permite que os dispositivos solicitem e/ou aceitem conexões sem sinal de voz com o propósito de permitir procedimentos *TCS-BIN*.
- **Sinalização DTMF:** permite que o dispositivo envie um sinal *DTMF* por uma rede externa, para responder a uma chamada.
- **Chamada externa recebida:** permite que o dispositivo aceite chamadas originárias de uma rede externa.
- **Inicialização:** permite que o dispositivo obtenha direitos de acesso a uma rede externa, por meio de um *gateway*
- **Chamada Intercom:** permite que um dispositivo localize e receba chamadas diretamente de outros dispositivos sem acessar uma rede de telefonia externa.
- **Suporte multi-terminal:** permite que um *gateway* manipule diversos terminais ativos (dispositivos telefônicos).
- **Desligar:** permite que o dispositivo finalize uma chamada (o que é uma parte essencial de todo telefone, é claro, mas um novo recurso para *headsets* sem fios).
- **Chamada externa enviada:** permite que um dispositivo localize uma chamada em uma rede de telefonia externa, através de um *gateway*.
- **Pós-discagem:** permite que um dispositivo envie informações de discagem depois que a mensagem de configuração de solicitação de chamada tiver sido enviada.
- **Registro de rediscagem:** permite ativar o "*flash hook*", recurso comum na maioria dos telefones de hoje.

A maioria dos recursos acima mencionados é obrigatória em qualquer telefone Bluetooth que incorpore o Perfil de Telefonia Sem Fio; apenas os recursos Pós-discagem, Suporte Multi-terminal e Informações da Chamada são opcionais.

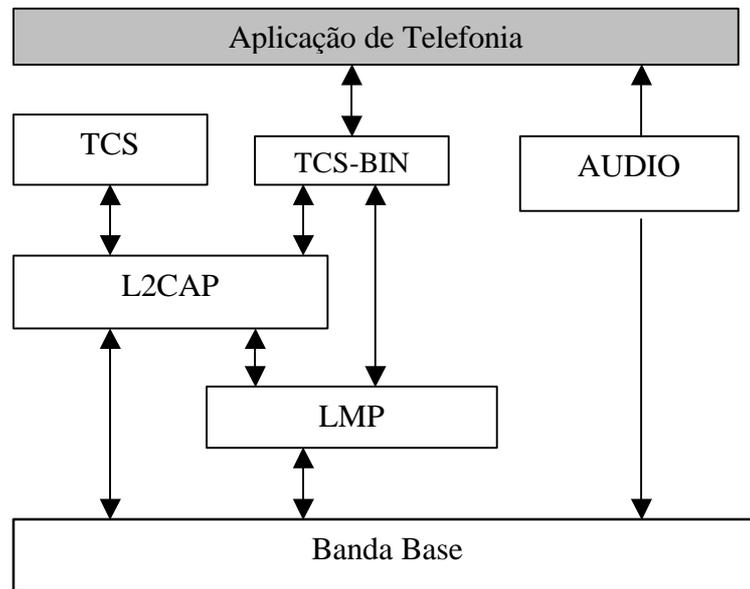


Figura 2.12: Pilha de protocolos do Perfil de Telefonia Sem Fio e do Perfil *Intercom*

### **Perfil *Intercom*, IntP**

Esse perfil (*Intercom Profile*), juntamente com o Perfil de Telefonia Sem Fio, foi desenvolvido para implementar um modelo de uso de telefone três-em-um. Ele mostra como um *handset* de telefone sem fio pode se conectar diretamente aos outros *handsets* como um *walkie-talkie* ou uma extensão do *handset*.

O perfil *Intercom* utiliza os seguintes protocolos: *TCS-BIN*, *SDP*, *L2CAP*, *LMP* e Banda Base, conforme mostrados na figura 2.12.

### **Perfil *Headset*, HSP**

Esse perfil (*Headset Profile*) foi desenvolvido para implementar o modelo de uso Headset Principal (*Ultimate Headset*) e permite a conexão sem fio de um *headset* (contendo o alto-falante e microfone) a um *handset* de telefone ou estação-base e a um computador pessoal.

O perfil *Headset* utiliza os seguintes protocolos: *RFCOMM*, *SDP*, *L2CAP*, *LMP* e Banda Base. Entre outros recursos, esse perfil permite o uso de comandos *AT*, o que possibilita que as chamadas recebidas sejam respondidas e finalizadas pelo *headset* sem que haja necessidade de se manipular fisicamente o *handset* do telefone ou a estação-base.

A figura 2.13 mostra a pilha de protocolos exigida para o perfil *Headset*. Como em outros perfis de telefonia, o fluxo de áudio está diretamente conectado protocolo Banda Base, evitando a camada *L2CAP*.

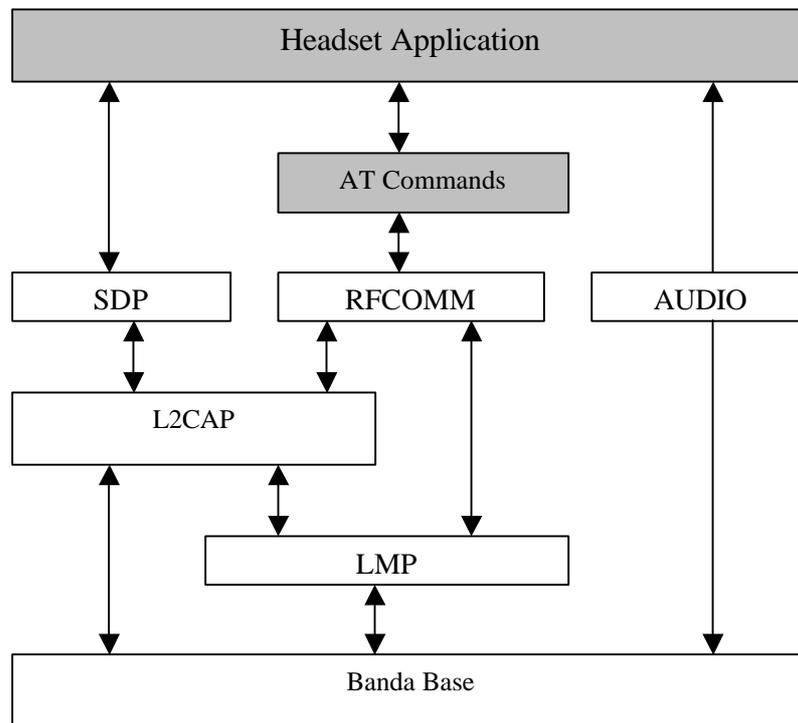


Figura 2.13 – Pilha de protocolos para o Perfil *Headset*.

### 2.4.3. Perfis de Rede

Existem três perfis que fazem parte do grupo Rede - os perfis de Acesso à LAN, de Acesso Discado à Rede e o perfil de Fax. Eles foram criados com base no perfil de Porta Serial, e no caso dos perfis de Acesso à LAN e Acesso Discado à Rede, também fazem uso de partes do perfil de Telefonia Sem Fio [MIL01].

### Perfil de Acesso a LAN, LAP

Esse perfil (*LAN Access Profile*) foi desenvolvido para implementar o modelo de uso para Acesso à LAN e é também utilizado para a implementação baseada em rede local do modelo para Conexão à Internet (*Internet Bridge*).

Nesse perfil diversos terminais de dados utilizam um ponto de acesso de rede local como uma conexão sem fio a uma rede local. Uma vez conectados, os terminais de dados operam como se eles estivessem conectados à rede local por meio da rede *dial-up* tradicional e podem acessar todos os serviços fornecidos pela rede.

Os protocolos utilizados nesse perfil incluem: *TCP*, *UDP*, *IP*, *PPP*, *RFCOMM*, *SDP*, *L2CAP*, *LMP* e Banda Base. A figura 2.14 mostra a pilha de protocolos exigida para a parte do terminal de dados (dispositivo remoto Bluetooth) do LAP.

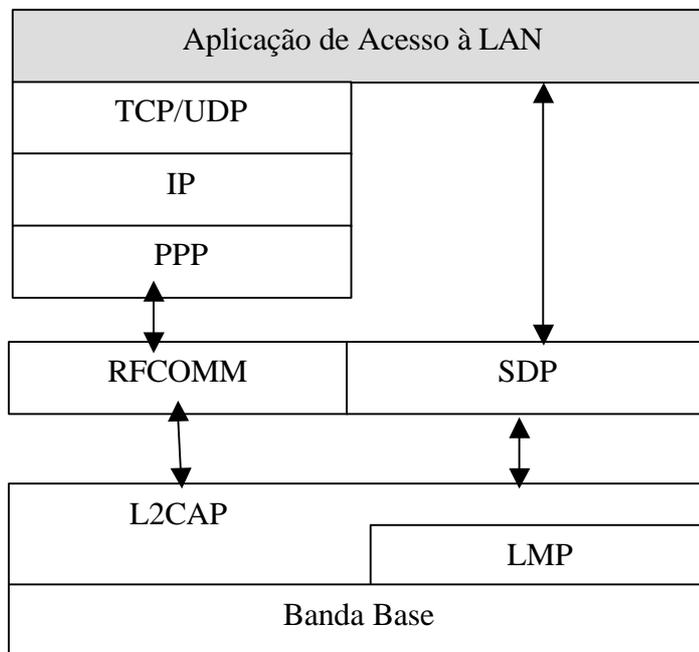


Figura 2.14: A pilha de protocolos do Perfil de Acesso à LAN

### Perfil de Acesso Discado à Rede, DUNP

Esse perfil (*Dial-up Networking Profile*) foi desenvolvido para implementar o componente *dial-up* do modelo de uso para Conexão à Internet (*Internet Bridge*). Nesse perfil, um telefone móvel ou modem sem fio atua como um modem para um computador pessoal ou PDA, fornecendo recursos de rede *dial-up* sem uma conexão física dedicada.

Os protocolos utilizados no *DUNP* incluem: *AT Commands*, *PPP*, *RFCOMM*, *SDP*, *L2CAP*, *LMP* e Banda Base.

A figura 2.15 mostra a pilha de protocolos exigida para esse perfil. Essa é, na verdade, uma pilha de protocolos de duas partes; os comandos *AT* necessários para controlar o telefone móvel/modem são a primeira parte da pilha, enquanto os comandos *PPP* necessários para transferir pacotes de dados formam a segunda parte.

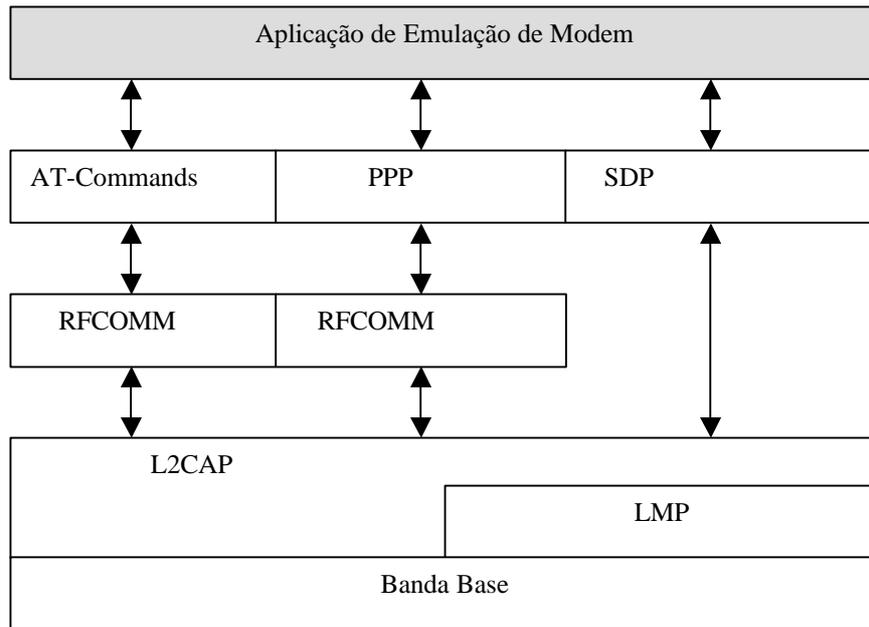


Figura 2.15: A pilha de protocolos para o Perfil De Acesso Discado à Rede

### Perfil de FAX

O Perfil de Fax é mais bem visualizado como um subconjunto do perfil de Acesso Discado à Rede. Como existem ligeiras diferenças entre transmissão de fax e transmissão/recepção de dados de computador, um perfil separado foi considerado necessário, embora as pilhas de protocolos pareçam idênticas.

Os protocolos utilizados nesse perfil incluem: *AT Commands*, *PPP*, *RFCOMM*, *SDP*, *L2CAP*, *LMP* e Banda Base. A visualização da pilha de protocolos é a mesma apresentada na figura 2.15.

#### 2.4.4. Os Perfis de Troca de Objetos

Todos os três perfis de troca de objetos lidam com a transmissão e recepção de objetos de dados - normalmente na forma de arquivos de computador. Por essa razão os três perfis incorporam o Perfil de Porta Serial, visto que os arquivos de computador têm sido transmitidos tradicionalmente por meio de portas seriais do PC [MIL01].

##### Perfil de Transferência de Arquivo, *FP*

Esse perfil (*File Transfer Profile*) foi desenvolvido para implementar vários modelos de uso diferentes – o de Transferência de Arquivo, o de Mensagem Proibida e o *Briefcase Trick*. Esses perfis definem como transferir objetos de dados de um dispositivo (computador, PDA, telefone inteligente e assim por diante) para outro. A finalidade desse perfil não está limitada a objetos, mas inclui vários tipos de arquivos de dados, pastas inteiras ou diretórios de arquivos, e arquivos de mídia de transmissão contínua. Também está incluída a habilidade para pesquisar os conteúdos de arquivos de um dispositivo remoto.

Aplicação de Transferência de Arquivo	
OBEX	
RFCOMM	SDP
L2CAP	LMP
Banda Base	

Figura 2.16: A pilha de protocolos para o Perfil de Transferência de Arquivo

##### Perfil de Sincronização, *SP*

Esse perfil (*Synchronization Profile*) foi desenvolvido para implementar o modelo de uso para Sincronização Automática (*Automatic Synchronizer*). Ele fornece sincronização de dispositivo-para-dispositivo do tipo de informações normalmente encontradas em software PIM (*Personal Information Manager*), incluindo nomes, endereços, números de telefones, endereços de correio eletrônico, agendas, compromissos, tarefas e anotações. O processo de sincronização exige que essas informações para serem transferidas e processadas por vários

tipos de dispositivos - incluindo PDAs, computadores e telefones móveis - utilizem um protocolo e um formato de dados comuns.

O Perfil de Sincronização é uma adaptação do protocolo *Infrared Object Exchange* (*IrOBEX*) padronizado pela Infrared Data Association (IrDA) e incorporado em muitos dos PDAs e computadores laptops de hoje. Dessa forma, abrange uma relação cliente/servidor entre dois dispositivos e utiliza aplicações de cliente e servidor desenvolvidas anteriormente pela Infrared Mobile Communications (IrMC).

Os protocolos utilizados por esse perfil incluem: *IrMC*, *OBEX*, *RFCOMM*, *SDP*, *L2CAP*, *LMP* e Banda Base.

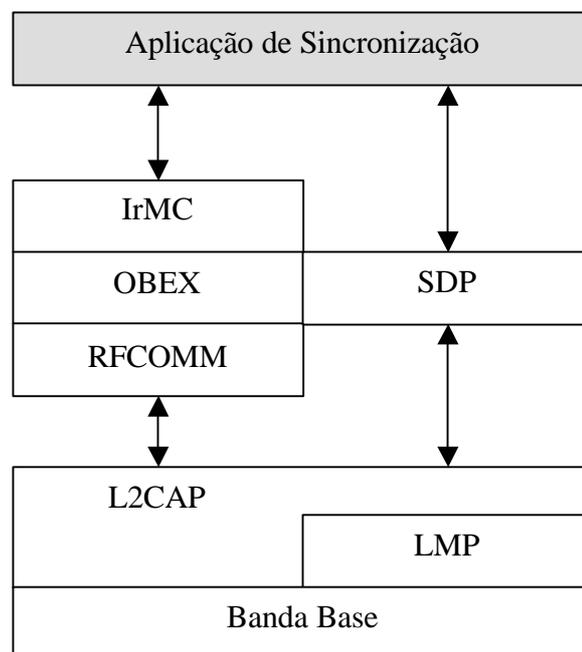


Figura 2.17: A pilha de protocolos para o Perfil de Sincronização

### **Perfil de Envio de Objetos, *OPP***

Esse perfil (*Object Push Profile*) foi desenvolvido para implementar um subconjunto específico do modelo de uso Transferência de Arquivos. Esse perfil trata da habilidade de recuperar dados de um dispositivo para outro e enviar dados em direção inversa. Também trata da captura e envio (uma troca de dados) simultâneo.

A aplicação mais típica desse perfil é a troca de cartões comerciais digitais (no formato *vCard*). Essa operação exige a intervenção do usuário; nesse perfil, a troca de dados não é automática.

As três funções principais suportadas pelo Perfil de Envio de Objetos são:

**Recuperação de objeto** (*Object Push*)

Inicia um processo que recupera um ou mais objetos de dados do cliente (dispositivo iniciante) para o servidor.

**Recuperação de cartão comercial** (*Business Card Push*)

Inicia um processo que envia um ou mais objetos de dados do servidor para o cliente (dispositivo iniciante).

**Troca de cartão comercial** (*Business Card Exchange*)

Inicia um processo que transfere objetos de dados simultaneamente entre dois dispositivos.

Os protocolos utilizados no Perfil de Envio de Objetos incluem: *OBEX*, *RFCOMM*, *SDP*, *L2CAP*, *LMP* e Banda Base.

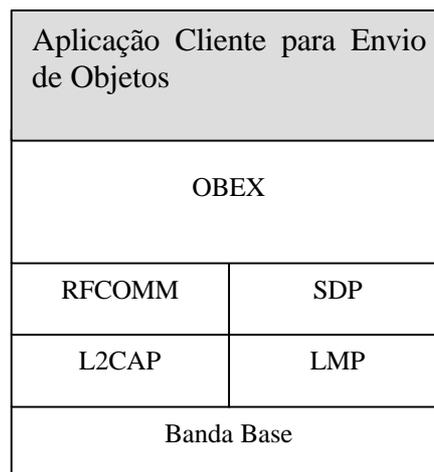


Figura 2.18: A pilha de protocolos para o Perfil de Envio de Objetos

## 2.5. Tecnologias Concorrentes e Complementares

A tecnologia Bluetooth não é a única solução de conectividade sem fio disponível hoje. Há diversas outras tecnologias que estão sendo expandidas para conexões em rede sem fios. Algumas são concorrentes diretas da tecnologia Bluetooth, outras são suficientemente diferentes para coexistir com a tecnologia Bluetooth e ainda complementarem as aplicações da tecnologia Bluetooth [MIL01]. Contudo não há um único concorrente óbvio em todos os segmentos de mercado em que a tecnologia Bluetooth pode operar. A seguir serão

examinadas algumas dessas tecnologias [AUS00]. E na tabela 2.4 é mostrado um quadro comparativo entre elas.

### **IrDA**

A principal tecnologia concorrente no segmento de mercado de substituição de cabos é o IrDA, que é um padrão de interface para infravermelho que possibilita conexões sem fio entre dois dispositivos, como por exemplo telefones celulares e PDAs [AUS00][SUV00]. A técnica é bem conhecida no mercado mas tem havido problemas por que alguns fabricantes de IrDA têm feito implementações incompatíveis com o padrão. O *payload* máximo da tecnologia IrDA excede o *payload* máximo do Bluetooth. As duas principais desvantagens com IrDA são que ela é limitada a conexões ponto-a-ponto e tem necessidade de linha de visada (uma vez que é baseada em raios infravermelhos).

### **WLAN IEEE 802.11**

Os principais concorrentes no segmento de mercado para Wireless LAN são as implementações baseadas no padrão IEEE 802.11 [AUS00][HEL01]. Algumas dessas implementações também usam a tecnologia de salto de frequência. As principais diferenças entre Bluetooth e essas implementações são:

- Implementações baseadas no IEEE 802.11 têm maior capacidade transmissão.
- O número de usuários simultâneos é maior para sistemas baseados em IEEE 802.11.
- O tamanho do equipamento Bluetooth é consideravelmente menor.
- A unidade de 5 Euros é dez a vinte vezes mais barata que uma unidade IEEE 802.11.
- O número de saltos de frequência é consideravelmente maior para Bluetooth do que para uma implementação IEEE 802.11.

### **Ultra-Wideband Radio, UWB**

Ultra-Wideband Radio, UWB, é uma nova tecnologia de rádio. O conceito é similar ao radar. Pulsos curtos são transmitidos em uma larga faixa de frequência. A informação é modulada pelo tempo e frequência dos pulsos. A técnica não está ainda completamente desenvolvida mas pode ser uma ameaça para o conceito Bluetooth devido a sua superioridade em capacidade e consumo de energia. Protótipos UWB indicam *payloads* de até 1.25 Mbit/s com 70 metros de alcance com apenas 0.5mW de consumo de energia [AUS00][LEE01].

Tabela 2.4: Comparação entre tecnologias sem fio [MIL01]

	<b>BLUETOOTH</b>	<b>Home RF</b>	<b>IEEE 802.11b Wi/Fi</b>	<b>IrDA</b>
Tecnologia	RF	RF	RF	Infravermelho
Uso principal	Substituição de cabos e conexões ad hoc entre dispositivos	Redes domésticas ou escritórios pequenos	Redes corporativas ou universitárias	Substituição de cabo e conexões ad hoc entre dois dispositivos próximos e com visada
Velocidade máxima	1 Mbps	10 Mbps	11 Mbps	4 Mbps
Alcance	10 metros	50 metros	100 metros	1 metro
Conecta através de paredes	Sim	Sim	Sim	Não
Ângulo de conexão	360 graus	360 graus	360 graus	30 graus
Suporte a dados	Sim	Sim	Sim	Sim
Suporte a voz/telefonia	Sim	Sim	Não	Sim
Compartilhamento de frequência	FHSS	FHSS	DSSS	
Requer pontos de acesso separados (estações base)	Não	Não	Sim	Não
Suscetibilidade à interferência RF	Média	Média	Alta	Nenhuma
Exigências de energia	Baixas	Alta	Alta	Baixas
Custo de fabricação por dispositivo	70 a 120 dólares	100 a 300 dólares		2 dólares
	<b>BLUETOOTH</b>	<b>Home RF</b>	<b>IEEE 802.11b</b>	<b>IrDA</b>

*FHSS - frequency hopping spread spectrum*

*DSSS - direct sequence spread spectrum*

## Home RF

Home RF é uma técnica desenvolvida por um consórcio com, entre outras, Microsoft, Intel, HP, Motorola e Compaq. A técnica é desenvolvida do conceito DECT (*Digital Enhanced Cordless Telephone*) e opera na faixa de frequência 2.4 MHz (a mesma do Bluetooth). A intenção tem sido desenvolver uma técnica para o mercado residencial. Existem diversas similaridades com Bluetooth, preço por unidade, distância, capacidade de transmissão, etc. As maiores diferenças são que Home RF pode tratar até 127 dispositivos por rede e usa somente 50 saltos de frequência por segundo, para 8 e 1600 respectivamente no Bluetooth [AUS00][HEL01].

## Pontos fortes da tecnologia Bluetooth

O conceito Bluetooth oferece diversos benefícios quando comparado com outras técnicas. As principais vantagens do Bluetooth são:

- Dimensões mínimas de hardware
- Baixo preço dos componentes Bluetooth
- Baixo consumo de energia das conexões Bluetooth

Essas vantagens fazem com que seja possível introduzir suporte para Bluetooth em muitos tipos de dispositivo a um baixo preço. A diversidade na oferta de produtos (telefones celulares, PDAs, computadores, componentes de computadores, notebooks, etc) por parte das companhias que compõe o Bluetooth SIG e seu suporte abrangente para a técnica estabelece uma posição única de mercado. Tanto os fabricantes de dispositivos quanto os de equipamentos irão trabalhar para introduzir Bluetooth em muitos dispositivos diferentes [AUS00].

## Qual a melhor tecnologia

Após se examinar as especificações e os prós e contras de cada tecnologia, uma boa maneira, de acordo com [MIL01], de posicionar a tecnologia Bluetooth e as outras tecnologias é a seguinte:

- A tecnologia Bluetooth é mais bem empregada como uma tecnologia de substituição de cabo e para estabelecer comunicações ad hoc particulares e públicas entre dois ou mais dispositivos (dentro de um alcance de 10 metros). Ela não tem o alcance ou largura de banda exigidos para aplicações de rede local sem fio.

- A tecnologia IrDA é mais bem empregada como uma tecnologia de substituição de cabo onde exista proximidade e linha de visada entre dispositivos. Ela não tem o alcance ou largura de banda exigidos para aplicações de rede local sem fio, o recurso de grande angular exigido para conexões públicas ad hoc ou o recurso de voz exigido para aplicações residenciais.
- A tecnologia Home RF é mais bem empregada em aplicações de rede residenciais, onde foi projetada para conduzir sinais de voz e dados com interferência mínima. Não tem o alcance ou a consistência necessários à aplicações de rede corporativa.
- A tecnologia IEEE 802.11 é mais bem empregada em aplicações de redes corporativas e de universidades. Atualmente não têm proteção de interferência adequada ou recurso de voz para aplicações residenciais.

Observa-se portanto que apesar de existir alguma complementaridade entre essas tecnologias, existe também alguma sobreposição, o que levanta a hipótese de que alguma dessas tecnologias possa ser considerada irrelevante pelo mercado. Quais serão as vencedoras e quais as perdedoras é impossível prever. Mas pode-se observar as tendências.

Para começar, conforme [MIL01], se tudo continuar no seu curso atual, é provável que a tecnologia Bluetooth suplante a IrDA para a substituição de cabo e conexões ad hoc. As forças da tecnologia Bluetooth (mais o apoio maciço da indústria) são, francamente, insuperáveis, em especial quando confrontadas com as limitações da linha de visada inerentes ao infravermelho.

Além disso, se puderem tornar a tecnologia 802.11/Wi-Fi mais fácil de se usar (e fixarem um preço ligeiramente mais baixo), é mais do que provável que a Wi-Fi se torne, de fato, o padrão para todas as redes sem fios – até mesmo residencial. Examinando de outra forma, é altamente improvável que a tecnologia HomeRF faça investidas no ambiente corporativo. Se um único padrão se destacar, é provável que esse padrão seja o Wi-Fi.

Isso deixa a tecnologia Bluetooth (de alcance limitado e conexões ponto-a-ponto) e IEEE 802.11/Wi-Fi (de redes sem fios) como as prováveis sobreviventes de qualquer guerra de tecnologia sem fio. Com muitas das empresas investindo nos dois padrões, espera-se ver no futuro os dispositivos Bluetooth e *Wi-Fi* modificados e comercializados para uma coexistência melhor, cada um focalizado sobre tipos diferentes de aplicações voltadas para o consumidor [MIL01].

Diante disso, seria possível garantir que a tecnologia Bluetooth será um sucesso? Certamente ainda é cedo para isso. Bluetooth é uma grande tecnologia e aparentemente oferece tudo o que o mercado deseja – um padrão global para conexões ad hoc rápidas e fáceis a um preço baixo, tamanho pequeno, peso leve e com baixo consumo de energia. Além disso, conta com o apoio de um grande número de empresas de porte. Mas existem desafios a serem superados, tanto no aspecto técnico quanto de marketing, até que ela alcance grande aceitação de mercado.

## 2.6. Tecnologia Bluetooth No Futuro

Conforme [MIL01], a próxima geração da tecnologia Bluetooth já está na etapa de planejamento. A versão 1.0 da especificação Bluetooth foi lançada em julho de 1999, uma modificação muito menor (a versão 1.0b) em dezembro de 1999 e uma revisão adicional, a versão 1.1, no início de 2001. O primeiro acréscimo importante à especificação será a versão 2.0, já em desenvolvimento, mas ainda sem previsão para ser lançada.

A especificação Bluetooth 2.0 será um aprimoramento à versão 1.0, não uma modificação. Isso sugere que a versão 2.0 incluirá novos modelos de uso e perfis, bem como extensões às especificações de desempenho básico. O trabalho conhecido em andamento para a versão 2.0 envolve projetos tais como:

- **Radio 2.0**

Esse grupo de trabalho é responsável pelo aperfeiçoamento da velocidade de transmissão dos dispositivos Bluetooth, para torná-la mais competitiva com as tecnologias concorrentes IrDA, HomeRF e IEEE 802.11.

Em particular, esse grupo está desenvolvendo um novo “modo de taxa alta” que pode ser adotado pela próxima geração de dispositivos Bluetooth. As especificações propostas incluem:

- Taxa de transmissão de 10Mbps no intervalo atual de 10 metros.
- Apoio simultâneo aos dispositivos escravos de taxa baixa e de taxa alta dentro de um única *piconet*.
- Baixo custo (o objetivo é 10 dólares).
- Herança compatível com a especificação 1.0.

Curiosamente, esse grupo não é responsável por aumentar o alcance da transmissão dos dispositivos Bluetooth. O que pode até mudar se o maior alcance dos concorrentes obtiver melhor aceitação do mercado.

▪ **Novos modelos de uso**

Existem diversos grupos de trabalho já estabelecidos que estão desenvolvendo modelos de uso e perfis para um número maior de aplicações da tecnologia Bluetooth. Esses novos modelos de uso potenciais, organizados por indústria e assunto, são:

- **Áudio/Vídeo:** responsável pelo desenvolvimento dos modelos de uso e perfis que integram a tecnologia Bluetooth no ambiente de aparelhos eletrônicos voltados para residência – focalizando principalmente a utilização de dispositivos de áudio (com qualidade CD) e vídeo.
- **Automotivo:** esse grupo de trabalho está desenvolvendo modelos de uso e perfis para dispositivos Bluetooth portáteis e embutidos no carro.
- **Dispositivos de Interface Humana:** esse grupo de trabalho focaliza em tudo que você usa para interagir com seu sistema de computador pessoal, sistema de entretenimento residencial e outros dispositivos e eletrodomésticos voltados para o consumidor.
- **Posicionamento local:** o objetivo desse grupo é fornecer opções de posicionamento mais granulares do que as que estão atualmente disponíveis em sistemas de posicionamento global baseado em satélite (GPS).
- **Rede Pessoal:** a versão 1.0 tratou apenas de soluções de redes baseadas em rede local e rede *dial-up*; ela não tratou da autêntica rede pessoal baseada em IP. O objetivo desse grupo é definir os padrões para redes pessoais ad hoc para dados, voz, vídeo e outras formas de comunicações de grupos de trabalho.
- **Impressão:** esse grupo é responsável pelo desenvolvimento das especificações de impressoras compatíveis com a tecnologia Bluetooth, incluindo a impressão diretamente de um notebook, micro de mesa, PDA, câmera fixa digital ou telefone móvel.
- **Tratamento de Imagens Estáticas:** esse grupo é responsável por integrar câmeras fixas digitais e dispositivos relacionados na especificação Bluetooth, com a meta de facilitar a troca de imagens estáticas digitais entre o gerador da

imagem e outro dispositivo, focando requisitos exclusivos de imagens digitais de alta qualidade.

É importante destacar que nem todos esses projetos estarão necessariamente presentes na próxima versão da especificação Bluetooth, ou ainda que novos não possam ser incluídos até o momento de sua liberação. De qualquer modo, isso dá uma boa idéia do volume de recursos e esforços colocados no desenvolvimento futuro da tecnologia Bluetooth.

Recente relatório sobre a tecnologia Bluetooth [PAL03a] informa que diversos perfis novos estão atualmente em processo de avaliação e aprovação pelo Bluetooth SIG. Espera-se que em breve sejam oficialmente liberados 13 perfis adicionais, a saber:

- *AVRCP – Audio/Vídeo Remote Control Profile*
- *ESDP – Extended Service Discovery Profile*
- *CIP – Common ISDN Access Profile*
- *PAN – Public Area Network Profile*
- *HCPR – Hardcopy Cable Replacement Profile*
- *GAVDP – Generic Audio/Visual Distribution Profile*
- *VDP – Video Distribution Profile*
- *HID – Human Interface Device Profile*
- *HFP – Hands-Free Profile*
- *BIP – Basic Imaging Profile*
- *BPP – Basic Printing Profile*

Conforme [PAL03b], a versão 2.0 da especificação Bluetooth não tem data prevista para ficar pronta, mas não é esperada em curto prazo. As previsões indicam que provavelmente deve levar ainda dois anos ou mais para isso aconteça. O que dever acontecer mais cedo, provavelmente até final de 2003, é a liberação pelo Bluetooth SIG da versão 1.2, que inclui diversas melhorias e implementações. As principais características a serem incluídas na versão 1.2 podem ser resumidas nos seguintes itens:

- Salto de frequência adaptativo
- Menor tempo de conexão
- Melhorias quanto a qualidade de serviço (QoS)
- Extensões para os canais tipo SCO (melhor qualidade de voz)
- Melhorias diversas (*Anonymity Mode*, por exemplo)

As modificações previstas para a versão 1.1 envolvem basicamente uma otimização da tecnologia atual. Mudanças mais profundas na tecnologia são esperadas somente para a versão 2, como por exemplo, uma possível implementação de uma proposta de alteração na camada MAC, alterando o atual esquema *master/slave*, entre outras questões que estão sendo avaliadas pelos grupos de trabalho do Bluetooth SIG.

## 2.7. Conclusão

A quantidade de dispositivos de telecomunicações e de equipamentos de computação tem crescido enormemente e cada vez mais se faz necessário uma maneira fácil de conectá-los visando a interação entre eles. A solução usual de conectar esses equipamentos através de cabos tem se mostrado complicada e inconveniente quando examinada do ponto de vista de seus usuários, que além de tudo, querem também ter mobilidade. Ou seja, cada vez mais e mais pessoas querem integrar esse tipo de dispositivos, de modo a poder manter atualizados e sincronizados os seus dados pessoais e de trabalho, em qualquer lugar onde estejam e sem terem de carregar consigo cabos de diferentes fabricantes e especificações. A tecnologia de infravermelho permite eliminar o cabo, mas exige proximidade e linha de visada, o que em muitas situações são requisitos muito restritivos e limitantes. Outras tecnologias de rede sem fio são relativamente caras e/ou consomem energia em níveis que não são apropriados para dispositivos pequenos e móveis.

Nesse contexto, foi visto que a tecnologia Bluetooth tem uma proposta atrativa e que pode captar a atenção dos consumidores, porque ela oferece a eles a possibilidade de fazerem coisas que de outro modo seriam inconvenientes ou mesmo impossíveis: sincronização de dados entre telefones celulares, laptops, e PDAs; usar telefones celulares como telefone sem fio em casa; conectar PDAs na rede local de seu escritório; e diversas outras possibilidades, tudo sem se preocupar com cabos e detalhes específicos para cada tipo de equipamento ou fabricante. O valor da proposta é sem dúvida forte. O desafio é para os fabricantes e fornecedores que devem satisfazer essas expectativas.

A tecnologia Bluetooth, que é resultado do esforço de um grande número de companhias (Bluetooth SIG) na busca de uma solução que fosse barata, de pequenas dimensões, com baixo consumo de energia, suportada globalmente, com garantia de interoperabilidade entre diferentes fornecedores, e, em fim, simples de usar, parece ser uma boa aposta.

A especificação Bluetooth define um padrão para conexão sem fio entre dispositivos, com baixo consumo de energia, que estejam numa distância de até 10 metros (ou 100 m para dispositivos classe 1) e um conjunto de perfis técnicos que estabelecem como as diferentes aplicações da tecnologia devem ser construídas e o que devem fazer para transmitirem dados ou voz entre os dispositivos. A definição de uma especificação base de uso genérico, combinada com a adoção de protocolos já testados no mercado, juntamente com a estratégia de padronizar perfis específicos para cada diferente cenário de aplicação e requerer dos fornecedores a submissão a um processo de certificação, antes de poderem lançar no mercado produtos com o selo Bluetooth, deve propiciar boa garantia de interoperabilidade das aplicações (o que é essencial para se obter escala de produção, que por sua vez deve levar a preços baixos).

Por tudo isso, as chances de que a tecnologia seja um sucesso parecem ser elevadas. Entretanto, além de alguns desafios técnicos, como por exemplo na área de segurança e de velocidade de transmissão, existem questões de mercado importantes a serem equacionadas, tais como prazo de disponibilidade de produtos de consumo, preço e efetiva aceitação pelos usuários.

A seguir, no capítulo 3, serão abordados de forma mais aprofundada os principais aspectos relativos a formação e uso de redes Bluetooth, particularmente as questões mais importantes relacionadas com as *scatternets*.

# Capítulo 3

## Interconexão de Redes Bluetooth

No capítulo anterior foi apresentada uma visão geral da tecnologia Bluetooth. Neste capítulo será abordada em maior profundidade a questão das *scatternets*, formadas pela interconexão de múltiplas *piconets* Bluetooth. Apesar de se tratar de uma possibilidade prevista, não há na especificação Bluetooth muito detalhe sobre esse assunto. Trata-se na verdade de um tema que ainda é objeto de pesquisa e desenvolvimento.

O uso de *scatternets* em grandes áreas geográficas se constitui no pilar fundamental das soluções delineadas para a construção de uma rede *wireless* apropriada para o cenário de aplicação considerado no contexto desse trabalho.

### 3.1. Redes Bluetooth

A estrutura básica de uma rede Bluetooth é a *piconet*, que pode ser definida como um grupo de dispositivos Bluetooth que compartilham um canal de rádio-frequência comum, baseado num sistema de salto de frequência cuja seqüência de salto é determinada de forma pseudo-aleatória. A *piconet* possui uma topologia em estrela e uma configuração do tipo *Master-Slave*. No centro dessa estrela um dispositivo Bluetooth desempenhando o papel de *master* coordena a comunicação com até outros sete dispositivos Bluetooth, que desempenham o papel de *slaves*. Um dispositivo Bluetooth pode desempenhar qualquer um dos papéis, mas em uma *piconet* só pode haver um dispositivo *master*. Um mesmo dispositivo pode ser *slave* em mais de uma *piconet* simultaneamente, mas só poderá ser *master* de uma única *piconet*. As *piconets* são formadas de modo ad hoc e podem ou não estar conectadas a uma rede com fio.

### 3.1.1. Bluetooth MAC

A tecnologia Bluetooth se distingue de outras soluções de rede principalmente pelas características de sua camada MAC (*Medium Access Control*). O sistema de transmissão adotado para a tecnologia Bluetooth é baseado na duplexação por divisão de tempo (TDD). Em uma *piconet* não existe transmissão direta entre dispositivos *slaves*, somente do *master* para o *slave* e vice-versa. Assim a comunicação em uma *piconet* deve ser organizada de modo que o dispositivo *master* possa endereçar periodicamente cada dispositivo *slave* de acordo com algum esquema de *polling*. O *master* pode enviar pacotes de dados para um *slave* somente nos *slots* ímpares, enquanto que o *slave* pode enviar um pacote para o *master* no *slot* par que se segue imediatamente após o pacote recebido do *master*. Cada *slot* tem a duração de 625  $\mu$ s, portanto, os dispositivos *slaves* devem estar rigorosamente sincronizados com o dispositivo *master* da *piconet* a que pertencem. Cabe ao dispositivo *master* gerenciar a capacidade de canal, através da alocação de pares de *slots* aos seus dispositivos *slaves*.

Uma *piconet* terá no máximo sete dispositivos em conexão ativa com *master*. Entretanto, é possível que o dispositivo *master* de uma *piconet* coordene um grupo maior de dispositivos Bluetooth. Isso pode ser feito através do uso do modo de operação *park*. Conforme apresentado em [KAL00], um dispositivo Bluetooth após se conectar a uma *piconet* poderá permanecer em um de quatro modos de operação: *active*, *sniff*, *hold* e *park*. Nos três primeiros modos um dispositivo *slave* mantém um endereço de 3 bits (AM\_ADDR, *active member address*) que é usado para se comunicar com o dispositivo *master*. No modo *park* o dispositivo libera o seu AM\_ADDR e recebe dois endereços de 8 bits (PM\_ADDR, AR\_ADDR). O PM\_ADDR (*Parked Member Address*) distingue um dispositivo dos demais dispositivos em modo *park*. É usado quando o procedimento de *unparking* é iniciado pelo *master*, enquanto que o AR\_ADDR (*Access Request Address*) é usado pelo *slave* para solicitar tal procedimento. O *slave* em modo *park* precisa ouvir transmissões periódicas (*beacon*) feitas pelo *master* para se manter sincronizado. Entretanto, os dispositivos em modo *park* não podem efetivamente participar (transmitir/receber dados) da *piconet*. Portanto, para que esses dispositivos possam se comunicar com o *master* deve haver um procedimento de troca (*swap*), onde o *master* periodicamente coloca um dispositivo ativo em modo *park* e vice-versa. Dessa forma, uma *piconet* poderá conectar e manter comunicação periódica com muito mais que do que sete dispositivos. Na verdade, uma *piconet* pode manter até 255 dispositivos em modo *park*, se o PM\_ADDR for usado, ou ainda um número maior, se o

próprio endereço de identificação de dispositivo Bluetooth (BD\_ADDR, *Bluetooth Device Address*, de 48 bits) for utilizado. Os procedimentos de *parking* e *unparking* de um dispositivo *slave* têm um certo *overhead* sobre a performance do sistema em função da perda de *slots* provocada pela execução desses procedimentos. Mas ainda assim trata-se de um recurso útil para muitas situações em que uma grande quantidade de dispositivos, todos dentro da mesma área de alcance do rádio Bluetooth, precisam se comunicar entre si, porém com baixa frequência e pequeno volume de dados.

Outra maneira de interligar um grande número de dispositivos Bluetooth é através da interconexão de várias *piconets*, formando uma *scatternet*. O assunto *scatternet* será abordado com mais detalhes na seção 3.2 deste capítulo.

### 3.1.2. Capacidade de uma *Piconet*

É interessante notar que independentemente da quantidade de dispositivos conectados, a capacidade máxima de transmissão de dados da *piconet* é sempre a mesma, ou seja, 1 Mbps no ar, que pode proporcionar um *link* com um pico de até 723 Kbps de *payload*, dependendo do tipo de pacote usado e do tipo de conexão estabelecida.

Se a *piconet* possui vários dispositivos, essa capacidade total de transmissão de dados deverá ser dividida entre os dispositivos que estiverem conectados a *piconet* da maneira mais eficaz e justa possível, considerando-se o cenário de aplicação envolvido.

Na tabela a seguir apresentam-se as taxas máximas de transmissão de dados que podem ser obtidas em uma *piconet*, dependendo dos tipos de pacote utilizados e se a conexão estabelecida é para um canal assíncrono simétrico ou assimétrico [BLU01a).

Tabela 3.1: Taxas máximas de transmissão de dados

Tipo de Pacote	Max.Payload (bytes)	Simétrico (Kbps)	Assimétrico (Kbps)	
DM1	17	108.8	108.8	108.8
DM3	121	258.1	387.2	54.4
DM5	224	286.7	477.8	36.3
DH1	27	172.8	172.8	172.8
DH3	183	390.4	585.6	86.4
DH5	339	433.9	723.2	57.6

Os tipos de pacotes mencionadas na tabela 3.1 referem-se aos pacotes de dados para canal assíncrono (ACL). Eles são designados como D(H/M)(1/3/5), onde “DM” está para média velocidade de dados, que usa codificação FEC a 2/3 para o *payload*; “DH” está para alta velocidade de dados, onde não é usado FEC para o *payload*; e os qualificadores numéricos indicam o a quantidade de *slots* ocupados pelo pacote.

Além desses, existem ainda os pacotes usados para canais síncronos (HV1, HV2, HV3, DV), geralmente utilizados para tráfego de voz, que apresentam uma taxa máxima de dados de 64 Kbps (simétrico) e os pacotes de controle de *link* (ID, NULL, POLL, FHS).

Observa-se, portanto, que o fator limitante mais crítico de uma *piconet* não é propriamente a quantidade de dispositivos que ela poderá suportar, como pode parecer a primeira vista, mas principalmente a demanda de tráfego que esses dispositivos irão gerar sobre a rede, o que está intrinsecamente ligado com o perfil da aplicação envolvida.

Um maior *throughput* de rede poderá ser alcançado através da otimização da configuração dos *links* com todos participantes da *piconet* (ajustando tamanhos de pacotes, por exemplo) e na medida que se fizer o melhor aproveitamento possível dos *slots* disponíveis, ou seja, que o número de *slots* usados para operações de gerenciamento da *piconet* ou que tenham somente pacotes de controle (tipo NULL ou POLL, por exemplo) sejam mínimos.

Um outro fator importante para o bom desempenho de uma rede Bluetooth é a disciplina de gerenciamento interno da *piconet* (*intra-piconet scheduling*) que deverá ser adotada pelo dispositivo *master*. Conforme [MIB01], o papel primário do dispositivo *master* de uma *piconet* é definir:

- qual a seqüência de salto de frequência que os membros da *piconet* deverão seguir;
- quando o salto de frequência deverá ocorrer, estabelecendo, portanto, a base referencial de tempo para os eventos da *piconet* que exigem sincronização temporal;
- qual frequência específica é a frequência “corrente”; e
- qual dispositivo *slave* será endereçado para que um pacote seja transmitido à ele e/ou para que um pacote possa ser recebido dele no *slot* subsequente.

Para os três primeiros itens da lista acima a especificação Bluetooth contém regras claras e detalhadas que devem ser observadas por todos os fabricantes. Já para o último item, que está mais ligado à forma como os membros de uma *piconet* trocam informações entre si, a especificação deixa a questão em aberto para que seja adotado o método de gerenciamento mais apropriado ao cenário de aplicação que se tem em vista. Desde então diversos algoritmos têm sido apresentados na literatura com essa finalidade.

### 3.1.3. Intra-Piconet Scheduling

Observou-se na subseção anterior que o algoritmo de gerenciamento interno da *piconet* (*intra-piconet scheduling, IRPS*) tem uma influência importante no desempenho geral da rede Bluetooth. Em [HAR02] é apresentado o resultado de um estudo sobre alguns desses algoritmos. Os principais algoritmos implementados e avaliados foram os seguintes:

- **Round Robin (RR):** o *master* se comunica com os *slaves* com base numa política “*round robin*”. Em cada ciclo (*round*) o *master* envia um único pacote para cada *slave*.
- **Round Robin Exaustivo (ERR):** o *master* se comunica com os *slaves* com base numa política “*round robin*”. Enquanto se comunicando com um *slave* o *master* envia pacotes até que sua fila e a fila do *slave* estejam vazias.
- **Round Robin Exaustivo baseado nas filas dos Slaves (SERR):** o *master* se comunica com os *slaves* com base numa política “*round robin*”. Enquanto se comunicando com um *slave* o *master* esgota a fila do *slave* (envia pacotes até que o *slave* responda com um pacote NULL).
- **Round Robin Exaustivo baseado nas filas do Master (MERR):** o *master* se comunica com os *slaves* com base numa política “*round robin*”. Enquanto se comunicando com um *slave* o *master* esgota a sua fila.
- **Round Robin com Prioridade (PRR):** o *master* seleciona (*poll*) os *slaves* de acordo com suas prioridades, permitindo que um *slave* seja selecionado mais freqüentemente que outro. As prioridades podem ser alteradas dinamicamente.
- **Fila mais Longa (LQ):** cada vez que o *master* pode enviar um pacote, ele verifica a situação das filas para os *slaves*. Ele seleciona (*poll*) o *slave* com a fila mais longa.

- **Fila mais Curta (SQ):** cada vez que o *master* pode enviar um pacote, ele verifica a situação das filas para os *slaves*. Ele seleciona (*poll*) o *slave* com a fila (não vazia) mais curta.

Esses algoritmos foram avaliados com relação a dois cenários diferentes. No primeiro considera-se somente tráfego do *master* para o *slave* e deste para o *master*. No segundo cenário considera-se tráfego entre *slaves*, roteado através do *master*. Os resultados da simulação indicam variações no desempenho de cada um dos algoritmos dependendo do perfil de carga considerado. Observa-se que o algoritmo *Round Robin Exhaustivo* (ERR) e o *Fila mais Longa* (LQ) apresentam bom desempenho em ambos os cenários até uma certa carga de tráfego. A partir de uma certa carga o algoritmo *Round Robin* apresenta melhor desempenho. Nota-se ainda que os algoritmos ERR e LQ têm como efeito adverso a possibilidade de ter todo o canal tomado por poucos dispositivos. As figuras 3.1 e 3.2 a seguir mostram um resumo dos resultados relatados em [HAR02].

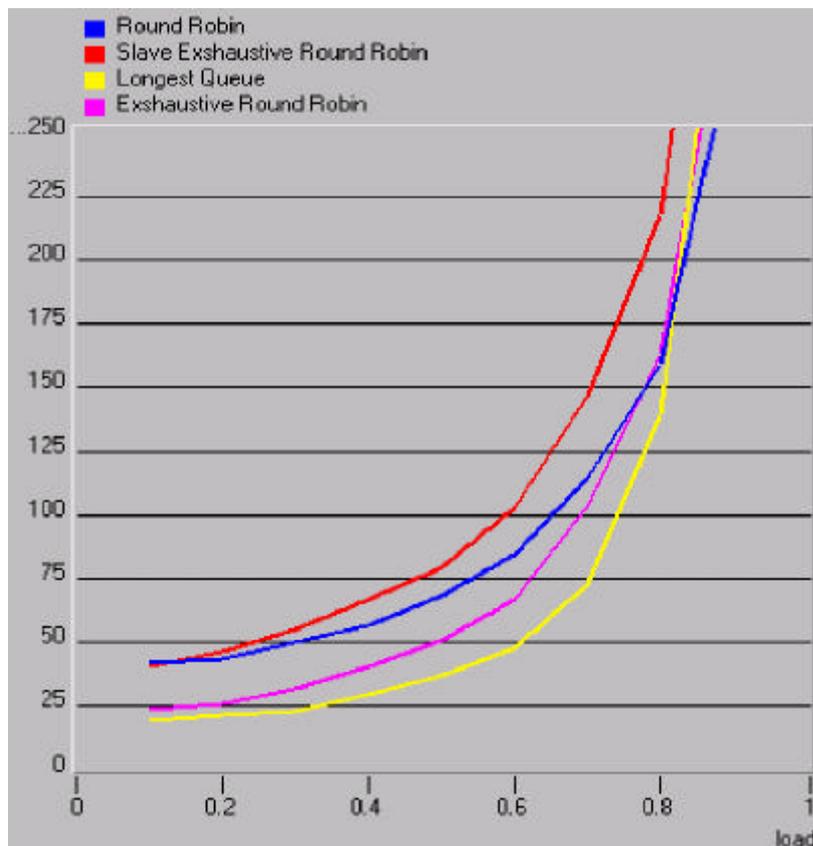


Figura 3.1: Atraso médio (*em slots*) de diferentes algoritmos numa *piconet* com 7 *slaves*, considerando somente tráfego entre *master* e *slaves*. [HAR02]

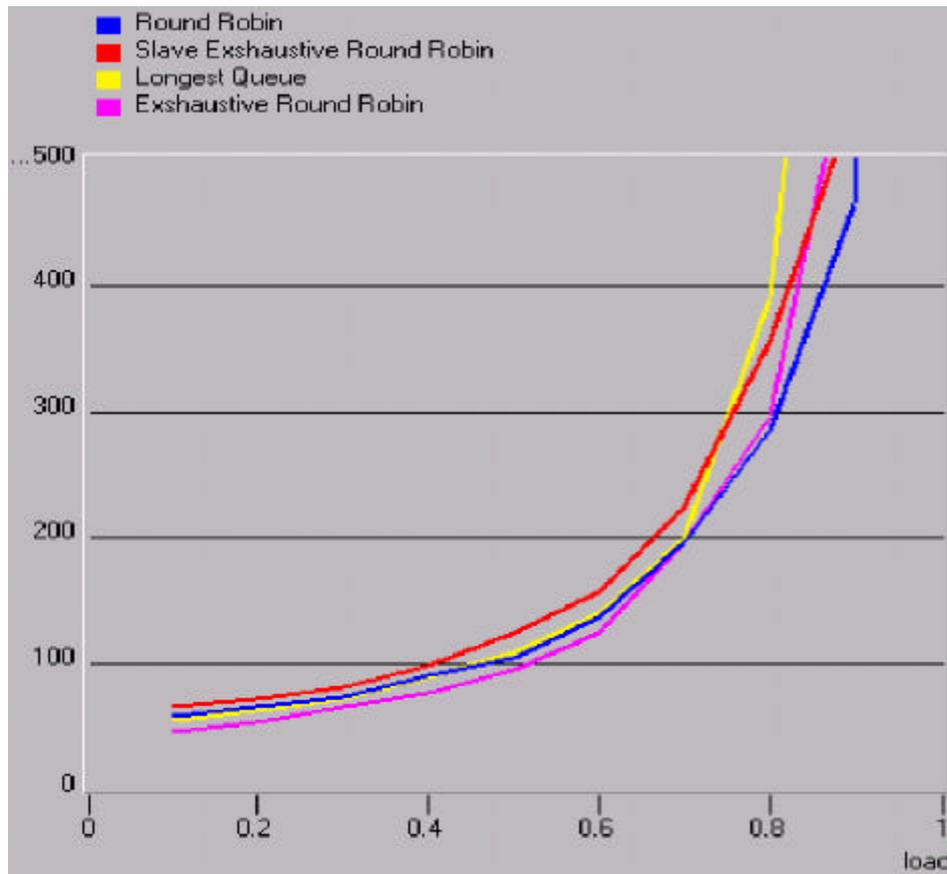


Figura 3.2: Atraso médio (em *slots*) de diferentes algoritmos numa *piconet* composta por 7 *slaves*, considerando tráfego entre *slaves*, com o *master* servindo de ligação [HAR02]

É importante observar que esses resultados consideram somente tráfego *intra-piconet*, ou seja, supõe-se que a *piconet* não está interligada a outras *piconets*, participando de uma *scatternet*.

Quando se considera uma *scatternet*, o desempenho de uma *piconet* em particular será afetado pela coexistência do algoritmo de *intra-piconet scheduling* com o algoritmo de gerenciamento de tráfego *inter-piconet*. Mas em contra-partida a capacidade total de uma *scatternet* é superior a capacidade de uma única *piconet*, o que pode ser usado em benefício de um melhor desempenho médio para todos os dispositivos que compõe a rede Bluetooth.

Na seção seguinte serão abordados os aspectos mais importantes com relação ao uso de *scatternets* Bluetooth.

### 3.2. *Scatternet* – Interconexão de Redes Bluetooth

A arquitetura Bluetooth permite a coexistência de múltiplas *piconets* com áreas de cobertura sobrepostas, de forma total ou parcial. Isso é possível porque, apesar de todas elas operarem na mesma banda, cada uma delas estará observando um padrão de salto de frequência diferente. Desse modo, a probabilidade de haver interferência de sinal de rádio entre elas é minimizada. Essas *piconets* podem operar numa mesma área de modo independente uma das outras ou podem ser interconectadas e operarem de forma cooperativa, trocando dados entre todos os seus dispositivos participantes.

Quando múltiplas *piconets* que compartilham uma mesma área são interconectadas e operam em cooperação, forma-se uma estrutura chamada *scatternet*. A figura 3.3 ilustra o uso de uma *scatternet* no contexto de uma PAN (*Personal Área Network*), onde o *master* da PAN 1 encaminha pacotes provenientes do telefone GPRS para os demais notebooks, fornecendo desse modo acesso Internet para todos os componentes da *scatternet*.

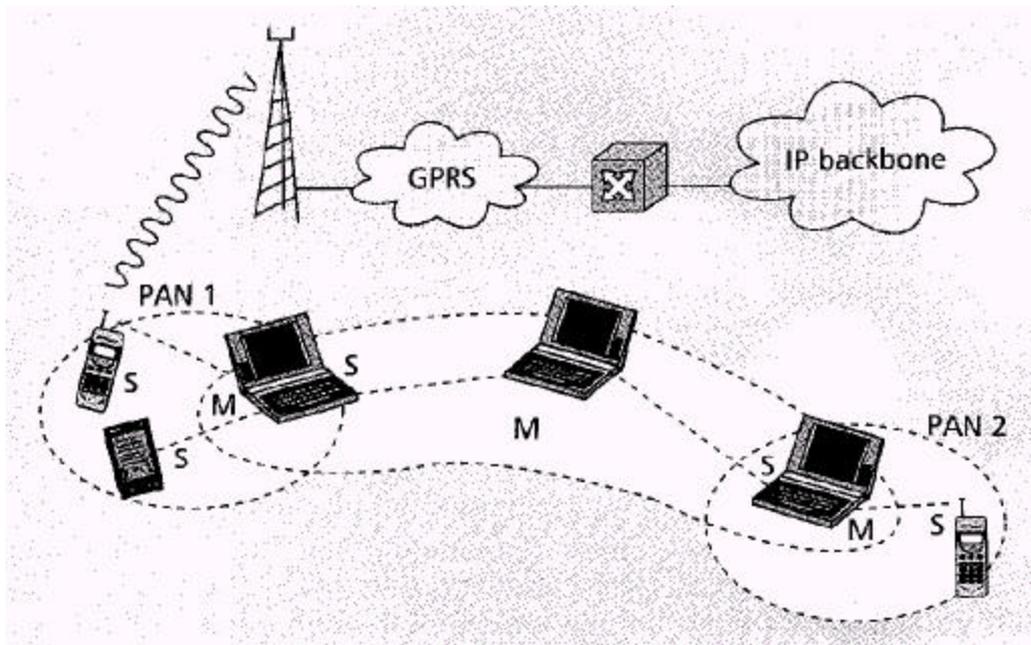


Figura 3.3: Exemplo de uso de uma *scatternet* no contexto de uma PAN [JOH01a]

As *scatternets* apresentam algumas vantagens funcionais importantes, tais como:

- permitem a interconexão de uma quantidade muito maior de dispositivos Bluetooth do que uma simples *piconet*;

- aumentam a capacidade total de uma rede Bluetooth, pois diversas *piconets* atuando em uma mesma área de cobertura podem funcionar simultaneamente com um grau mínimo de interferência entre elas;
- permitem ampliar o alcance geográfico da rede Bluetooth, pois as áreas de cobertura de cada uma das *piconets* interconectadas podem estar apenas parcialmente sobrepostas.

Considere-se, por exemplo, que na figura 3.3 a *PAN 2* está fora da área de cobertura da *PAN 1*, mas interligada por uma terceira *piconet* que une as duas primeiras. A *scatternet* resultante tem, portanto, um alcance geográfico maior que uma simples *piconet*. Outras *piconets* poderiam ser agrupadas na mesma estrutura de *scatternet*, permitindo-se desse modo a interconexão de dispositivos ainda mais distantes, caracterizando-se assim uma rede de múltiplos saltos, onde um pacote de dados é encaminhado da sua origem até o seu destino passando por diversos nós intermediários.

A distância que poderá ser coberta através de uma *scatternet* depende fortemente da aplicação envolvida. Se a *scatternet* é usada para interconectar, por exemplo, uma grande rede de sensores equipados com Bluetooth, onde o fluxo de informação pode ser mantido com taxas de dados muito baixas e grandes retardos podem ser tolerados, então o número de saltos pode ser da ordem de dezenas ou até centenas. Por outro lado, uma aplicação de vídeo sob demanda com alta qualidade dentro de uma *PAN* pode tolerar somente um salto e nem ser capaz de atravessar uma *bridge* entre *piconets* devido ao impacto do retardo resultante.

A estrutura de *scatternet* pode também ser usada para melhorar o desempenho de uma rede Bluetooth baseada numa única *piconet* [JOH01a].

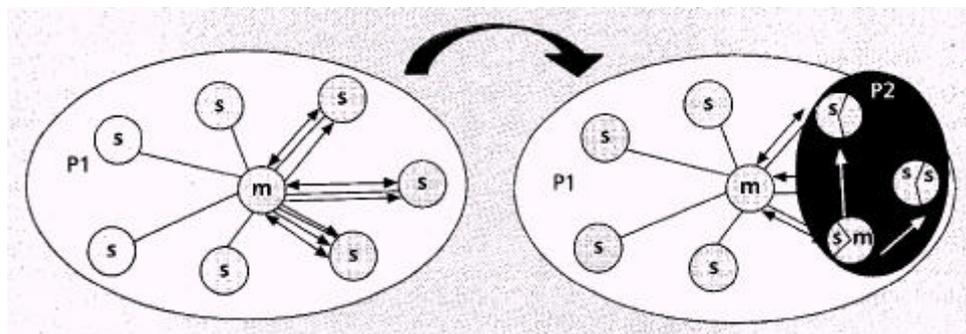


Figura 3.4: Uso de *scatternet* para melhorar o desempenho de uma rede Bluetooth [JOH01a]

A figura 3.4 ilustra essa situação, mostrando uma *piconet* com tráfego mais intenso entre três *slaves*, cujos dispositivos são re-arranjados em uma *scatternet* formada por duas *piconets*, onde a segunda *piconet* acrescenta mais capacidade para o tráfego entre esses *slaves*, sobrando mais banda para os dispositivos que permanecem na primeira *piconet*, sem que se perca a possibilidade de comunicação entre todos os dispositivos que formavam a *piconet* original.

A interconexão de *piconets* é feita através de dispositivos Bluetooth que são comuns a duas ou mais *piconets*, conforme mostrado na figura 3.5. Esses dispositivos comuns, geralmente chamados de *bridges*, fazem a ligação entre os demais dispositivos das *piconets* nas quais participam, encaminhando pacotes de dados entre eles. Entretanto, a participação desses dispositivos *bridges* em diferentes *piconets* é feita com base numa multiplexação por divisão de tempo, uma vez que o rádio desses dispositivos só poderá estar sincronizado na seqüência de salto de frequência de uma *piconet* de cada vez. Assim, um dispositivo pode participar como *slave* em várias *piconets*, mas estando presente em cada uma delas de forma intermitente, em diferentes instantes de tempo. Embora cada *piconet* só possa ter um *master*, um dispositivo que é *master* numa *piconet* poderá participar de outra *piconet* na condição de *slave*. Ambas as formas de interconexão, a baseada em um dispositivo *master/slave* e a que é baseada em um dispositivo *slave/slave* (também chamado de “*slave* compartilhado”) são ilustradas na figura 3.5 a seguir.

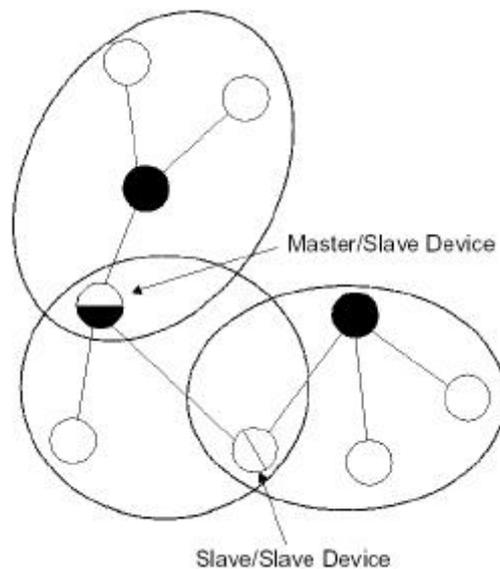


figura 3.5: Uma *scatternet* formada por três *piconets* [BAA02]

A participação de um dispositivo em várias *piconets* pode ser implementada com base nos diferentes modos de operação previstos na especificação Bluetooth. Assim, um dispositivo *slave* pode entrar em modo *hold* ou *park* na *piconet* corrente e durante esse tempo ele pode trocar os parâmetros de canal e se juntar a outra *piconet*. O modo *sniff* também pode dar tempo suficiente para que o dispositivo *slave* visite outra *piconet* durante o intervalo entre *slots* de *sniff* [KAL00]. Um dispositivo *master* que queira participar como *slave* em outra *piconet* deve antes suspender as comunicações em sua *piconet*, para depois trocar de papel, mudando para *slave* e então poder participar da outra *piconet*. Essa é uma operação que demanda um tempo relativamente maior que a simples mudança de modo de operação de um *slave*. Por essa razão, geralmente a forma mais eficiente de se estruturar uma *scatternet* é através do uso de dispositivo que faz o papel de *slave* compartilhado (*slave/slave*).

Em [KAL00] é apresentado um estudo com base em dois modelos de estrutura de *scatternet*: o primeiro deles organiza as *piconets* de uma *scatternet* em dois níveis de hierarquia e usa como *bridge* dispositivos que são *masters* das *piconets* pertencentes ao segundo nível e fazem o papel de *slaves* na *piconet* de primeiro nível (portanto, aplica-se o modelo *master/slave*); o segundo modelo interconecta as *piconets* através de *slaves* compartilhados (*slave/slave*). Ambos modelos de *scatternet* são comparados com um modelo de rede baseado em uma única *piconet*. Dentre as conclusões dos autores, com base nos resultados de simulação, destaca-se dois pontos: em primeiro lugar o estudo confirma que o desempenho obtido com uma *scatternet* ultrapassa o desempenho apresentado por uma única *piconet*; e com relação às duas formas de se estruturar uma *scatternet*, o estudo demonstra que o modelo baseado em *slave* compartilhado (*slave/slave*) apresenta desempenho superior ao modelo *master/slave*.

Uma outra questão importante com relação ao desempenho de uma *scatternet* diz respeito ao gerenciamento de tráfego entre as *piconets* que a compõe. Conforme visto na seção 3.1, o dispositivo *master* controla o tráfego dentro da *piconet* de acordo com algum algoritmo, que determina a capacidade de banda a ser distribuída entre os dispositivos *slaves* (*intra-piconet scheduling*, *IRPS*). Uma *scatternet* terá pelo menos um dispositivo que participa de forma intermitente em duas ou mais *piconets*. Portanto, é necessária a definição de um algoritmo para gerenciar a presença desse dispositivo nas diversas *piconets* em que participa. O principal desafio desse algoritmo, geralmente chamado de *inter-piconet*

*scheduling (IPS)*, é fazer isso de tal forma que o tráfego possa fluir entre as *piconets* e dentro delas do modo mais eficiente possível.

### 3.2.1. *Inter-Piconet Scheduling*

De acordo com [JOH02], a principal questão com relação ao gerenciamento de tráfego entre *piconets* é a coordenação de presença dos dispositivos que fazem o papel de *bridge* entre as *piconets* que compõe a *scatternet*. Numa *piconet*, o dispositivo *master* sempre espera que o dispositivo *slave* esteja presente quando ele envia um pacote de dados ou um pacote do tipo *poll* para ele. Se o dispositivo *slave* não está presente, o *master* pode optar por desconectar o *slave*, depois de decorrido um período de *time-out*, pois a situação pode ser interpretada como um problema relacionado ao canal de rádio (dispositivo fora do alcance de rádio, desligado ou com interferência, por exemplo). Contudo, um dispositivo que faz o papel de *bridge* estará periodicamente visitando outras *piconets* e não estará simultaneamente presente para todos os seus *masters* como parte de sua operação normal. Portanto, essa presença intermitente de um dispositivo *bridge* deve ser considerada por todos os seus *masters* como parte de um algoritmo para gerenciamento de tráfego entre as *piconets* (*inter-piconet scheduling*).

Além disso, os *slots* de tempo dos canais das *piconets* em geral não estarão sincronizados com relação à diferentes *piconets*, o que introduz um retardo de um ou dois *slots* (0.625 ms cada) a cada vez que um dispositivo muda de uma *piconet* para outra. Isso resulta num *overhead* que deve ser levado em conta no projeto de um algoritmo de gerenciamento de tráfego *inter-piconet*.

Além do algoritmo de gerenciamento de tráfego *inter-piconet* o dispositivo *master* de cada *piconet* deverá executar a função de gerenciamento de tráfego *intra-piconet*, isto é, a função que controla o *polling* dos *slaves* dentro da *piconet*. Essas funções de gerenciamento *inter* e *intra-piconets* devem ser coordenadas de modo a se obter maior eficiência no gerenciamento dos dispositivos da *scatternet*. Por exemplo, um dispositivo *bridge* poderia ser removido da lista de *pooling* do algoritmo de gerenciamento de tráfego *intra-piconet* durante o período em que ele não estará presente na *piconet*, e, uma vez que ele esteja de volta, ele poderia ser re-incluído e marcado para ser escalado para *polling* com mais frequência. A figura 3.6 ilustra uma *scatternet* consistindo de duas *piconets* interligadas através de um dispositivo *bridge* fazendo o papel de *slave compartilhado (slave/slave)* [JOH02].

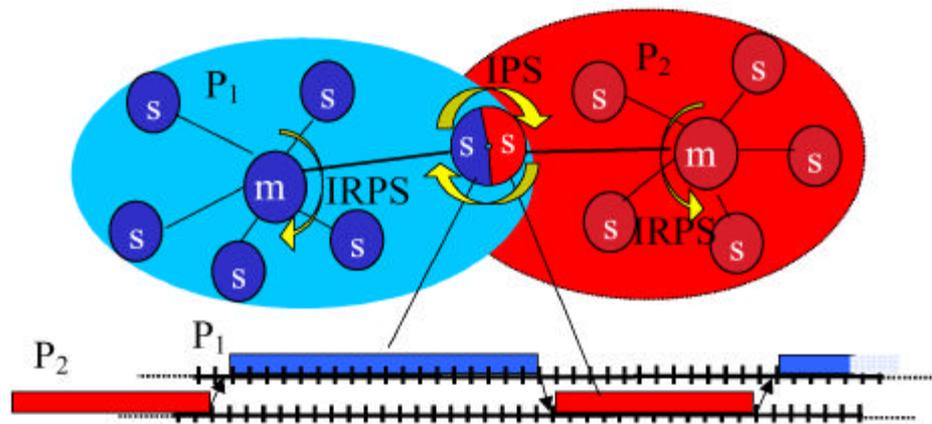


Figura 3.6: Uma *scatternet* com um dispositivo de interligação (*bridge*) que divide seu tempo entre as duas *piconets* [JOH02]

As duas linhas de tempo na figura mostram como a multiplexação por divisão de tempo para o dispositivo *bridge* precisa levar em conta o deslocamento de fase quando estiver saltando de uma *piconet* para outra. Quando o dispositivo *bridge* está presente em uma das *piconets* o algoritmo IRPS daquela *piconet* determina a quantidade de *polling* que ele deverá receber.

A especificação Bluetooth não faz nenhuma recomendação quanto a forma de se fazer o gerenciamento de tráfego *inter-piconet* em uma *scatternet*, tanto quanto não o faz para o gerenciamento *intra-piconet*. Tendo em vista a ausência de qualquer padrão na especificação com relação à essas questões, diversos algoritmos de gerenciamento *inter-piconet* têm sido propostos na literatura, baseados em diferentes abordagens.

Em [JOH02] é apresentado um algoritmo para gerenciamento *inter-piconet* baseado no conceito de *pontos de encontro* (*rendezvous points, RP*). Um ponto de encontro (*RP*) é um *slot* no qual o *master* e um dispositivo *bridge* tenham concordado em encontrar-se, ou seja, nesse *slot* o *master* concorda em endereçar um pacote para o dispositivo *bridge* e este último concorda em estar ouvindo o *master*. Nesse tipo de abordagem duas questões importantes devem ser tratadas:

- com relação ao ponto de encontro (*RP*): como o *master* e o *slave* decidem sobre o *RP* e com que rigor o compromisso para um *RP* é estabelecido? Num algoritmo mais rigoroso os dispositivos *master* e *slave* sempre honrarão o *RP*. Mas na verdade, diversas regras podem ser estabelecidas. A distribuição de

*RPs* ao longo do tempo pode ser feita de forma periódica, pode ser decidida a cada visita, ou distribuída de acordo com uma seqüência pseudo-randômica (conhecida por ambos, *master* e *slave*). As características do retardo introduzido por um algoritmo *IPS* dependem, em grande parte, do tempo decorrido entre dois pontos de encontros honrados mutuamente;

- com relação à janela do *RP*: considerando que o *master* e o *slave* estejam presentes num *RP*, qual a quantidade de dados que eles serão capazes de trocar? Isso depende da duração do período em que ambos os dispositivos estão presentes e quanto desse tempo é usado para enviar dados. Num algoritmo mais rigoroso uma janela de tempo (chamada janela de encontro) pode ser definida, na qual ambos os dispositivos, o *master* e o *slave bridge*, devem estar presentes e trocar dados em cada *slot* disponível. Um algoritmo menos rigoroso pode não exigir um período de tempo pré-estabelecido para que o *master* e o *slave* permaneçam no *RP*. O desempenho alcançado por esse par de dispositivos depende da duração da janela de encontro.

O algoritmo proposto em [JOH02] usa pontos de encontro estabelecidos de forma periódica e janelas de encontro cujo tamanho é acordado entre o dispositivo *master* e o *slave*. A implementação do algoritmo é baseada na funcionalidade do modo de operação *sniff*.

Outro algoritmo baseado em *sniff mode* é proposto em [BAA01], posteriormente estendido em [BAA02]. Nesse caso, o mecanismo de *sniff mode* é usado para estabelecer os pontos de encontro, mas eles não são necessariamente honrados pelas duas partes. Além disso, a duração de um período de comunicação entre dois nós (um *master* e um *bridge*) não é pré-determinada, pois ela depende do nível atual de utilização do *link* e da quantidade de dados que já foi trocada. Para tanto, os autores introduzem um sofisticado sistema de créditos com o qual se estabelece um esquema de prioridades usado para orientar a distribuição de banda entre os dispositivos participantes da *scatternet*. Desse modo se obtém uma maneira bastante flexível de se adaptar às variações na distribuição de carga da rede.

Em [RAC01] é apresentada uma proposta de gerenciamento de tráfego *inter-piconet* e *intra-piconet* baseada num algoritmo que estabelece pontos de encontro com seus pares de tal modo que, a seqüência de pontos de encontro observa um processo pseudo-randômico que é diferente para cada par de nós. Em cada ponto de encontro (também chamado *checkpoint*) o dispositivo *master* verifica ativamente se o *slave* correspondente a esse *checkpoint* está

presente enviando um pacote para ele. O dispositivo *slave* por sua vez verifica passivamente a presença de seu *master*, ouvindo o *master* correspondente ao *checkpoint* e enviando um pacote de resposta no caso dele estar sendo endereçado. A troca de pacotes de dados iniciada num *checkpoint* pode ser continuada nos *slots* seguintes. Um dispositivo permanece ativo no *link* corrente enquanto houver dados para serem enviados, tanto na direção do *master* para *slave* quanto do *slave* para o *master*, ou até que o dispositivo tenha que sair para um próximo *checkpoint* com um outro de seus *links*. O comportamento esperado dos dispositivos é que eles estarão presentes em cada *checkpoint* correspondente aos seus *links* e verificam se seus pares têm dados para transmitir. A unicidade da seqüência aleatória garante que os pontos de encontro com diferentes pares irão colidir apenas ocasionalmente. Essa característica elimina a necessidade de troca explícita de informação de controle entre os dispositivos, o que permite um gerenciamento mais eficiente. Outra característica importante do algoritmo é a existência de um ajuste dinâmico na frequência de encontros entre dois pares, o que permite um tratamento mais eficiente para situações em que os dados se apresentam em forma de rajadas.

Em [HAR02] é proposto um algoritmo de gerenciamento de tráfego *inter-piconet* para *scatternets* de pequena escala. Esse algoritmo é baseado na funcionalidade do modo de operação *hold* e sua implementação não requer qualquer alteração nas especificações Bluetooth. O algoritmo atua num dispositivo *bridge* determinando a duração das atividades desse dispositivo nas diferentes *piconets* em que ele participa de forma a reduzir o tempo de retardo dos pacotes de dados que devem ser encaminhados através dele. Ele procura se adaptar à variações de carga usando informações de controle mantidas em suas filas para os diferentes *master* e algumas informações transferidas pelos *masters* ao dispositivo *bridge*. Nesse mesmo trabalho os autores descrevem também um algoritmo baseado em *sniff mode*, que é tomado como referência para uma avaliação de desempenho do algoritmo proposto baseado em *hold mode*. O estudo conclui, através das simulações realizadas com ambos os algoritmos, considerando-se *scatternets* de pequeno porte, que o algoritmo baseado em *hold mode* apresenta desempenho ligeiramente superior que o outro baseado em *sniff mode*.

Além desses algoritmos já mencionados, outras propostas estão disponíveis na literatura, com diferentes abordagens, como, por exemplo, o algoritmo apresentado em [JON01] que propõe uma alteração na especificação, criando um *JUMP mode*; e o algoritmo proposto em [ZHA02] que sugere um esquema baseado num conceito de tabelas de troca (*switch-table*) para evitar conflitos de presença dos dispositivos *bridges* (que ocorrem na

medida em que um dispositivo *bridge* pode ser endereçado por um dispositivo *master* enquanto está sincronizado com o *master* de outra *piconet* que faz parte de uma mesma *scatternet*).

Finalizando esse tema, uma arquitetura funcional para gerenciamento de *scatternet* é proposta em [JOH01a]. Trata-se de uma arquitetura genérica que permite a coexistência de uma grande variedade de algoritmos de gerenciamento *inter-piconet* e considera a interação desses com outras funções que devem existir num dispositivo Bluetooth típico.

### 3.2.2. Formação de *Scatternet*

Outro aspecto importante com relação ao uso de redes Bluetooth diz respeito a como interconectar um conjunto de dispositivos de modo a formar uma *scatternet*. As *scatternets* podem ser usadas em diferentes ambientes, podendo envolver pequenos ou grandes conjuntos de dispositivos, que podem ainda ser fixos ou móveis e estarem ou não todos incluídos em uma mesma área de cobertura, entre outros aspectos. Portanto, diferentes ambientes de aplicação podem determinar diferentes características de rede, em termos de conectividade, distribuição de tráfego e mobilidade dos dispositivos, que devem ser atendidas por uma *scatternet*. Assim, os dispositivos devem ser organizados em *piconets* interconectadas de tal forma que a *scatternet* tenha uma topologia otimizada para atender as características exigidas para a rede. Os objetivos a serem otimizados podem ser, por exemplo, uma *scatternet* que apresente mínimo retardo ou máximo desempenho, ou ainda, que minimize o consumo de energia nos dispositivos da rede.

Em alguns ambientes será razoável configurar uma *scatternet* de modo estático, como é feito tipicamente para as redes com fio e mesmo para algumas redes *wireless*. Entretanto, em muitos ambientes, principalmente os que envolvem cenários de redes ad hoc, a entrada e saída relativamente freqüente de dispositivos e a mobilidade fazem com que a configuração manual seja problemática. Torna-se necessário, portanto, algum tipo de protocolo para a construção automática de *scatternets*. Esse protocolo, a partir de um certo conjunto de dispositivos Bluetooth, deve formar as *piconets*, designando alguns dispositivos para atuarem como *master* e outros como *slave*, e interconectá-las através de dispositivos designados para o papel de *bridges*, de tal modo que a *scatternet* resultante seja conectada segundo alguma topologia. Ou seja, que haja pelo menos um caminho de acesso que permita a troca de mensagens entre todos os dispositivos que compõe a rede.

Diversos protocolos de formação de *scatternets* têm sido propostos na literatura, tendo geralmente como referência à sua aplicação em cenários de redes ad hoc. Em [SAL01] por exemplo, é proposto um protocolo projetado para funcionar no que se chama de “cenário de conferência”, que pressupõe que todos os dispositivos Bluetooth estão em uma mesma área de cobertura de rádio e que são ligados praticamente ao mesmo tempo. Esse protocolo inclui um esquema simétrico de formação de *links* que dispensa qualquer configuração prévia de papéis, *master* ou *slave*, para os dispositivos e elimina a necessidade de conhecimento prévio da quantidade de dispositivos a serem conectados. Nesse esquema cada dispositivo que deseja estabelecer uma conexão com outros dispositivos deve alternar continuamente entre os estados *INQUIRY* e *INQUIRY SCAN* e tentar se conectar com um dispositivo que esteja em um estado diferente do seu. O tempo de permanência em cada estado é aleatório. Em seguida o protocolo usa um processo de eleição para determinar um dispositivo líder que irá configurar uma topologia específica para a *scatternet* com base nas informações coletadas na primeira fase sobre todos os dispositivos participantes do processo. O protocolo funciona bem para redes pequenas (até 36 dispositivos), mas atende a um cenário de aplicação restrito.

Em [TAN01] é apresentada uma proposta que vai além do “cenário de conferência”. Ou seja, nesse caso não é requerido que todos os dispositivos estejam dentro de uma mesma área de cobertura de rádio e tampouco há um limite na quantidade de dispositivos na rede. Além disso, ele permite que os dispositivos entrem ou saiam da rede a qualquer tempo, pois ele constrói a topologia de forma incremental e é capaz de refazer as ligações quando ocorre alguma ruptura na estrutura, decorrente da saída de um dispositivo (em razão de ter sido desligado, ter acabado a bateria ou simplesmente ter se distanciado para além do alcance de rádio do dispositivo com o qual estava conectado à rede). A *scatternet* formada é baseada em uma estrutura de árvore, que simplifica o roteamento de mensagens e o gerenciamento de eventos de comunicação, pois não há que se preocupar com rotas em *loop* e existe um único caminho entre dois nós quaisquer. Um protocolo simétrico para formação de *links* também é utilizado e um método dinâmico, não centralizado, é adotado para designar quais dispositivos fazem o papel de *master* e quais fazem o papel de *slave*. Para minimizar o número médio de *piconets* por nó *bridge* o algoritmo garante que cada nó *bridge* participa de exatamente duas *piconets*.

Conforme [TAN01], uma topologia em árvore é efetiva na redução do tempo médio de latência de comunicação entre todos os pares de nós para redes TDM, como é o caso de

Bluetooth. Os autores apresentam uma avaliação métrica com relação a diversas topologias, mas argumentam que a idéia que sustenta essa afirmação, de que a topologia em árvore é bastante eficiente, é em razão dela minimizar a quantidade total de *links* e o número médio de *piconets* por nó *bridge*. Minimizando-se a quantidade total de *links* numa topologia se reduz o potencial de contenção por *slots* de transmissão no esquema TDD do Bluetooth. Reduzindo a média de *piconets* por nó *bridge* evita-se que os nós *bridges* se tornem gargalos de comunicação, pois eles participam em múltiplas *piconets* com base numa divisão por tempo. Os efeitos sobre a performance de uma *scatternet* com relação à questão da quantidade de *links* e do grau de *overhead* sobre os nós *bridges* foram também avaliados e identificados como parâmetros críticos no trabalho apresentado em [MIK00].

Em [LAW01] é apresentado mais algoritmo para formação de redes de pequeno porte, onde o pressuposto é de que todos os dispositivos estão no mesmo raio de alcance (típico do cenário de conferência). O método de formação de *scatternet* proposto procura otimizar alguns indicadores de qualidade previamente definidos pelos autores. Basicamente, eles propõem duas medidas de desempenho para se avaliar um protocolo de formação de *scatternets*, que é o tempo de formação e a quantidade de mensagens trocadas, argumentando que uma *scatternet* deve ser formada o mais rápido possível, para minimizar o retardo percebido pelo usuário, e com o menor número possível de troca de mensagens entre os dispositivos, pois isso reduz o consumo de energia, que é uma questão relevante para a maioria dos dispositivos Bluetooth num ambiente de redes ad hoc típico. E, considerando-se que é crucial que a *scatternet* construída deve ter boa qualidade, ou seja, deve facilitar a comunicação *inter-piconet* e apresentar bom desempenho de rede, os mesmos autores sugerem também alguns parâmetros como indicadores de qualidade, que são:

- Quantidade de *piconet*: é uma medida de eficiência da *scatternet*. Uma vez que todas as *piconets* compartilham o mesmo conjunto de 79 canais de frequência, haverá mais colisões quanto maior for a quantidade de *piconets* na mesma área.
- Grau máximo de um dispositivo: refere-se ao número máximo de *piconets* à qual um dispositivo pertence. Se um *slave* pertence a muitas *piconets* (portanto, apresenta grau elevado) então ele poderá ficar sobrecarregado e se tornar um gargalo nas comunicações *inter-piconets*.

- Diâmetro de rede: refere-se ao número máximo de saltos entre qualquer par de dispositivos. Isso fornece uma estimativa do retardo máximo da rede.

Geralmente será necessário um bom balanceamento entre os indicadores acima para se obter uma *scatternet* de boa qualidade.

Outras propostas de protocolos de formação de *scatternets* estão disponíveis na literatura. Elas variam quanto método de solução, mas todas têm em comum o fato de visarem principalmente cenários de redes ad hoc. O que é bastante compreensível, dado que Bluetooth é uma tecnologia bastante promissora para essa área.

### 3.2.3. Roteamento em *Scatternet*

Outra questão importante com relação a *scatternet* é a forma de roteamento de mensagens. Considerando-se o cenário de redes ad hoc, os protocolos de roteamento podem ser categorizados, segundo [SUN02], em dois grandes grupos: protocolos de roteamento *table-driven* e protocolos de roteamento *on-demand*. Nos protocolos *table-driven* cada nó ativamente mantém uma tabela de roteamento, tenha ele mensagem para enviar ou não. Evidentemente o principal problema desse tipo de protocolo é o *overhead* para manter as tabelas de roteamento em cada nó. Além disso, como o tamanho da tabela de roteamento é proporcional ao tamanho da rede, o protocolo tipo *table-driven* pode requerer mais memória do que seria conveniente acomodar em um pequeno dispositivo Bluetooth. Nos protocolos de roteamento *on-demand*, um nó desejando enviar uma mensagem primeiro inunda a rede com uma *query* para aprender a rota até o destino, antes que ele possa enviar a mensagem propriamente dita. A desvantagem desse tipo de roteamento reside no retardo provocado pela fase de *query* e pela inundação de pacotes de *query*.

Em [BHA99] é apresentado um método de roteamento baseado no conceito de vetor de rotas, que é um modo eficiente de se codificar os passos da rota de origem (*source route paths*) numa *scatternet* Bluetooth. Os autores descrevem o protocolo para descoberta de rota (*on-demand*) e o protocolo de encaminhamento de pacotes. O método é adequado para redes Bluetooth de pequeno porte.

A forma de roteamento de mensagens entre os dispositivos é bastante influenciada pela topologia adotada para estruturar a *scatternet*. E o algoritmo de roteamento, por sua vez, também é um aspecto relevante para o desempenho da rede. Reconhecendo isso, alguns

autores têm apresentado propostas que tratam em conjunto as questões de formação e roteamento em *scatternets* Bluetooth.

Em [SUN02] é apresentado uma proposta de topologia para *scatternets* baseadas em árvores binárias. Com esse tipo de estrutura o roteamento pode ser feito com base num *header* de tamanho fixo nas mensagens, sem a necessidade de tabelas de roteamento, independente de qual seja o tamanho da *scatternet*. Essas características tornam o método adequado para lidar com redes de maior porte. O controle é assíncrono e distribuído, e o algoritmo preserva a característica de roteamento sem tabelas mesmo quando os dispositivos entram e saem da rede ou quando uma *scatternet* é fundida com outra. Assim como outras propostas já mencionadas anteriormente nesta seção, o método proposto presume que todos os dispositivos estejam num mesmo raio de cobertura, muito embora seja indicada, como trabalho futuro, uma possibilidade de estender o método para tratar a situação em que nem todos os dispositivos estejam próximos uns dos outros, através da criação de *clusters*, que seriam depois, de algum modo, interconectados uns aos outros.

Outra proposta, bastante recente, que procura tratar de forma conjunta as questões de formação, roteamento e protocolos de manutenção de *scatternets*, é apresentada em [LIN03]. Neste caso é proposta uma topologia em anel, com fluxo logicamente direcionado. Em cada *piconet* dois de seus *slaves* são designados para o servirem de *bridges*, um para conectar a *piconet* anterior (*upstream*) e outro para conectar a *piconet* posterior (*downstream*). Os pacotes são encaminhados de acordo com a direção de fluxo estabelecida no anel até encontrar o seu destino. O roteamento é do tipo sem estado, ou seja, não faz uso de tabelas de roteamento ou de protocolos de descoberta de rota. Mas em cada pacote Bluetooth são acrescentados alguns campos de controle, incluindo o endereço de destino e de origem (BD\_ADDRESS). Para tolerar falhas em um único ponto do anel, um mecanismo de correção é previsto no protocolo. A tolerância à falhas em múltiplos pontos ainda deve ser objeto de trabalhos futuros, por isso em situações desse tipo o procedimento de recuperação exige a reconexão do anel. O gerenciamento de presença dos dispositivos *bridges* em suas respectivas *piconets* é baseado no modo de operação *park*. Conforme os autores, a arquitetura proposta é adequada para dispositivos de pequena capacidade computacional, típicos de redes domésticas, mas é escalável para *scatternets* de médio tamanho, contendo em torno de 50 a 70 unidades Bluetooth.

No contexto de aplicações de *WPAN* diversos cenários consideram a conexão com serviços via Internet. Por isso seria muito importante que houvesse um suporte de rede que fornecesse capacidade para se transportar de forma eficiente o protocolo IP dentro (e através) de uma Bluetooth PAN. Nesse sentido, encontra-se em avaliação pelo Bluetooth SIG uma proposta de implementação do que é referido como BNEP – Bluetooth Network Encapsulation Protocol, cujo objetivo é oferecer uma infra-estrutura para encapsular e transportar os protocolos de rede mais conhecidos, tais como IP e IPX. Na pilha de protocolos Bluetooth o BNEP é proposto como uma camada que ficaria acima do L2CAP e abaixo do IP. Entretanto, não se trata ainda de uma proposta aplicável para as *scatternets*, pois a primeira versão do BNEP tem como foco atender uma única *piconet* [JOH01b].

### 3.3. Conclusão

Neste capítulo foram destacados os principais aspectos técnicos relacionados com a formação e uso de redes Bluetooth. Na seção 3.1 foram apresentados os pontos relevantes da estrutura básica de uma rede Bluetooth, que é a *piconet*, incluindo-se a sua topologia, características principais da camada de acesso ao meio físico (Bluetooth MAC), questões relativas à capacidade de transmissão de uma *piconet* e algoritmos de gerenciamento de tráfego *intra-piconet*.

A seção 3.2 colocou em destaque a questão da interconexão de redes Bluetooth, que é alcançada através da estrutura denominada *scatternet*. Nela foram abordados os benefícios técnicos obtidos com o uso de *scatternets*, bem como os seus aspectos mais críticos, incluindo-se questões relativas aos métodos de formação das *scatternets*, protocolos de roteamento e algoritmos de gerenciamento de tráfego *inter-piconet*, com menção aos principais trabalhos de pesquisa e desenvolvimento disponíveis atualmente na literatura.

No próximo capítulo será apresentada uma proposta que considera o uso de *scatternets* para construir uma rede *wireless* que possa dar suporte a um sistema de telemetria de serviços de distribuição de energia elétrica. A solução delineada tem como base principal o uso de *scatternets* Bluetooth em grandes áreas geográficas e inclui a definição de uma topologia, estrutura e algoritmo de roteamento, caracterizando um serviço de rede Bluetooth apropriado para o cenário de aplicação considerado.



## Capítulo 4

### Usando *Scatternets* em Ampla Área Geográfica

No capítulo 1 foi mencionado que um sistema de telemetria poderia atender importantes demandas das companhias de distribuição de energia elétrica e para tanto foi acenada a possibilidade de se usar a tecnologia Bluetooth para viabilizar a comunicação entre os dispositivos da rede. Apresenta-se a seguir uma visão geral da solução delineada, abordando alguns aspectos sobre o sistema de telemetria de serviços de distribuição de energia, particularmente suas demandas de comunicação, e principalmente sobre o uso que se pretende fazer das *scatternets* para equacionar o problema de obter uma rede de comunicação de dados de alta capilaridade e baixo custo, que seja capaz de suportar as funcionalidades requeridas por um sistema dessa natureza.

#### 4.1. O Sistema de Telemetria Adotado como Referência

Conforme foi visto anteriormente, no capítulo 1, os desafios que esse trabalho pretende superar têm como motivação as demandas de comunicação de dados de um sistema centralizado de telemetria de serviços de distribuição de energia elétrica, baseado em dispositivos eletrônicos de medição e controle interligados através de uma rede de comunicação *wireless*. A seguir é fornecida uma breve descrição dos objetivos e funcionalidades desse sistema para melhor caracterizar o problema que se pretende resolver com o uso da tecnologia Bluetooth.

## **Objetivos do Sistema**

O sistema de telemetria deverá monitorar e controlar os medidores eletrônicos de energia e outros dispositivos de controle eventualmente existentes na rede de distribuição de energia elétrica de uma determinada região urbana. Os dispositivos dessa região deverão estar interligados através de uma rede de comunicação de dados que suporte as demandas do sistema. Essa rede poderá ser implantada de forma gradativa, podendo haver num dado momento diversas regiões sendo monitoradas, não necessariamente regiões adjacentes umas as outras.

O sistema deverá permitir que os dados de consumo de energia, das residências de uma região monitorada, sejam automaticamente coletados e enviados para um servidor central, de acordo com frequência pré-estabelecida pela companhia de distribuição de energia elétrica. Tipicamente essa frequência poderá variar desde coletas a cada 10 ou 15 minutos até uma coleta mensal por ponto de medição.

Além disso, deverá ainda haver suporte para que algumas ações, como por exemplo ativar/desativar o fornecimento de energia para uma residência específica, sejam executadas através de telecomandos, a partir de um ponto central ou de um servidor móvel, por operadores devidamente identificados e autorizados.

Outros tipos de informações ainda poderão ser transmitidos pela rede que interconectará os dispositivos, como, por exemplo, dados de qualidade do serviço de distribuição de energia, alertas de segurança, e dados para manutenção das configurações e da programação dos próprios dispositivos.

A seguir serão descritos os requisitos básicos do sistema de telemetria de serviços de distribuição de energia, no nível funcional e de dados. Não é uma descrição exaustiva, pois o interesse nesse momento é apenas de caracterizá-lo juntamente com suas principais demandas para que, em seguida, as questões envolvendo a construção de uma solução de rede de comunicação de dados que seja adequada para atender aos seus requisitos sejam abordadas.

## **Requisitos Básicos do Sistema**

O sistema de telemetria de serviços de distribuição de energia elétrica deverá tratar pelo menos as seguintes funções:

1 – Coleta automática mensal de dados de consumo de energia, incluindo dados para tarifa convencional e para tarifa amarela (consumo no horário de pico e fora do pico). Essa função sempre deverá abranger todos os medidores de uma região atendida pelo sistema.

2 – Coleta continuada de consumo de energia de um consumidor (medidor) específico, realizada durante um certo período de tempo  $t$  e com uma frequência de coleta  $F_c$ , ambas as variáveis determinadas pelo usuário do sistema e alteráveis dinamicamente. Essa coleta poderá ainda ser realizada para todos os medidores de uma determinada área geográfica ou para um grupo de medidores pré-estabelecido. Em ambos os casos o período de coleta ( $t$ ) poderá ser definido a critério do usuário, podendo variar desde curtos períodos (alguns dias) até períodos mais longos ou mesmo indeterminados, quando então a função seria executada de forma continuada até ser suspensa pelo usuário. A frequência de coleta ( $F_c$ ) deverá ser especificada em minutos.

3 – Ativação e desativação do fornecimento de energia para uma determinada residência por telecomando, desde que o respectivo medidor possua dispositivo de controle apropriado e as condições de segurança (local permitido, operador autorizado, etc.) sejam atendidas. Esse tipo de função poderá ser executada a partir do servidor central ou através de um equipamento móvel (por exemplo, laptop ou palmtop), para uso de equipes de manutenção em campo.

4 – Coleta de dados de qualidade do serviço de distribuição de energia elétrica relativos a cada consumidor (medidor), tais como DIC <sup>6</sup> e FIC <sup>7</sup>, que são exigidos pela ANEEL. Essa função poderá ser executada para todos os medidores de uma região ou para grupos específicos.

5 – Informação de consumo corrente de uma residência a partir de consulta do próprio consumidor. Essa consulta poderá ser feita através de vários meios: telefone, celular, Internet, ou até mesmo através de um dispositivo *wireless* de curto alcance do próprio consumidor com programação apropriada fornecida pela companhia de energia.

6 – Funções de apoio, tais como: ativar ou desativar um novo medidor ou dispositivo de controle na rede, tratar mensagens de alerta de segurança (tentativa de violação de equipamentos, por exemplo), configurar dispositivos para instalação em campo, configuração

---

<sup>6</sup> DIC: Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

<sup>7</sup> FIC: Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

da rede de comunicação de dados, usuários e operadores autorizados a usar o sistema, e similares.

No quadro a seguir é apresentada uma lista não exaustiva das principais entidades e grupos de dados que devem ser tratados pelo sistema, a fim de melhor caracterizar o seu contexto e os possíveis reflexos que suas funções e dados possam ter sobre a rede de comunicação:

**Medidor**

\*Número do medidor  
 Data de instalação  
 Tipo de medidor  
 (simples,múltiplo,trifásico,bifásico,monofásico)  
 Endereço de instalação do medidor  
 \*Id. do Consumidor  
 Tipo de atividade  
 (residencial,comercial,industrial)  
 Situação operacional  
 (ativo,suspenso,desativado)  
 Data hora da última leitura

**Cliente**

\*Id do Consumidor  
 Nome do consumidor  
 Endereço do consumidor

**Registro de Medição de Consumo**

\*Número do medidor (9 bytes)  
 \*Data hora da medição (12 bytes)  
 Registro de consumo tarifa normal (9 bytes)  
 Registro de consumo tarifa amarela (9 bytes)

**Registro de Qualidade de Serviço**

\*Número do medidor  
 \*Data hora do registro  
 Quantidade total de interrupções de fornecimento  
 Duração total das interrupções de fornecimento

**Registro de interrupções de Fornecimento**

\*Número do medidor  
 \*Número da interrupção  
 Data hora de início da interrupção  
 Data hora de término da interrupção  
 Tipo de interrupção  
 (programada,falha,comercial,manutenção)

**Registro de eventos de segurança**

\*Número do medidor  
 \*Número do evento  
 Tipo de evento  
 Classificação de gravidade  
 Descrição do evento  
 Data hora de ocorrência

\* campos que compõe uma chave primária ou estrangeira.

É interessante observar que a função de coleta continuada de consumo é a que terá maior impacto no que diz respeito ao volume de dados que irá trafegar sobre a rede. O tipo de registro que tem maior importância quanto a esse aspecto é o “registro de medição de consumo”, que deverá ter algo como 40 a 50 bytes (ver principais campos no quadro anterior). Além disso, serão necessários alguns campos adicionais para controle e endereçamento de mensagens. Ao todo, considerando-se também uma margem para futuras expansões, será tomado como referência neste trabalho um tamanho de 80 bytes para a mensagem de aplicação que conterá os dados de medição de consumo de um medidor. O volume total na rede será influenciado ainda pelos parâmetros que determinam a abrangência e a frequência de coleta desse tipo de registro. De acordo com algumas companhias de energia elétrica, uma coleta de dados de consumo com frequência de 10 a 15 minutos de intervalo entre cada tomada é mais do que suficiente para se compor um perfil detalhado de consumo por cliente e para se trabalhar estatisticamente com esses dados nos sistemas de gerenciamento de distribuição de cargas e de análise de perdas na rede de energia elétrica. Aliás, seria um grande avanço, se comparado com a situação atual, em que o nível de informação disponível é em geral de um registro de consumo por mês para cada cliente, havendo casos em que o intervalo de tempo é ainda maior (coleta bimestral ou trimestral). Neste trabalho, salvo quando explicitamente mencionado outro valor, estará sendo considerado como requisito que as coletas serão feitas para todos os medidores de uma área de atuação do sistema e com a frequência de uma tomada a cada 10 minutos por medidor. Portanto, esse requisito funcional caracteriza o pico de volume de dados que a rede de comunicação deverá ser capaz de dar vazão.

Outra funcionalidade do sistema que caracteriza uma demanda importante sobre a rede é a previsão de realização de certas funções por “servidores móveis”, ou seja, através de equipamentos (laptops, por exemplo) operados em campo por funcionários autorizados pela companhia de distribuição de energia, para realizar funções diversas, quer seja de coleta de dados de consumo de grupos específicos de medidores, ativação/desativação de fornecimento ou outras funções de manutenção da rede. Aqui a questão importante não é de volume, mas de capacidade de aceitação de conexões ad hoc e de endereçamento das mensagens, que eventualmente poderão ser trocadas entre dois pontos quaisquer pertencentes a rede. Adicionalmente, são importantes também as questões de segurança.

As demais funções do sistema se caracterizam por ter pouco impacto em termos de volume e praticamente demandam os mesmos tipos de recursos que as funções de coleta continuada e de “servidores móveis” anteriormente mencionadas, à exceção, talvez, das funções de manutenção da própria rede de comunicação, que poderão demandar algum recurso específico como, por exemplo, o uso de “*pairing*” para configuração inicial dos dispositivos.

Uma questão importante, que permeia praticamente todas as funções do sistema, é o cuidado quanto aos aspectos de segurança. O acesso à rede e ao sistema deverá ser restrito aos equipamentos e pessoas previamente autorizadas. As mensagens contendo informações consideradas sensíveis deverão ser criptografadas.

#### **4.2. A Rede de Comunicação para Suporte ao Sistema de Telemetria**

Considerando as demandas de comunicação de dados do cenário de aplicação mencionado anteriormente, uma combinação de características indica que há aqui um potencial interessante para aplicação da tecnologia Bluetooth, principalmente como solução de comunicação para os segmentos de maior capilaridade da rede que deverá suportar o sistema de telemetria.

Observam-se diversos pontos que correspondem aos requisitos, tais como as questões de baixo custo por unidade, tamanho pequeno e baixo consumo de energia, aliado a uma capacidade e flexibilidade de comunicação de dados mais do que suficiente para atender a demanda gerada pelos medidores de consumo de energia e pelas mensagens de controle e sinalização eventualmente geradas pelo servidor central ou por outros dispositivos. Pode-se acrescentar ainda as vantagens proporcionadas por uma tecnologia padronizada, aberta, disponível globalmente, atuando numa faixa do espectro livre de licenciamento, e suportada por um conjunto importante da indústria eletrônica e de telecomunicações, com uma solução tecnicamente robusta, incluindo garantia de interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fornecedores. Todos esses aspectos indicam que a tecnologia Bluetooth é uma boa alternativa para ser incorporada nos medidores e demais dispositivos de controle da rede de distribuição de energia.

A principal questão a ser equacionada seria as distâncias que podem estar envolvidas numa rede de distribuição de energia elétrica, já que a tecnologia Bluetooth em princípio está

voltada para conexões de curta distância. A solução considerada pressupõe que haverá pelo menos um dispositivo Bluetooth (classe 1) a menos de 100 m um do outro. Esse dispositivo, planejado para ser colocado no poste, seria o próprio medidor de energia com uma interface Bluetooth, ou, em alguns casos, um dispositivo Bluetooth usado especificamente para permitir a interconexão entre medidores de energia que se encontrem a mais de 100 m de distância entre si. Esse dispositivo deverá estar conectado aos dispositivos nos postes vizinhos, que por sua vez seriam conectados aos seus outros vizinhos e assim sucessivamente. A figura 4.1 ilustra essa situação, em que os dispositivos mais próximos entre si formam uma *piconet* e cada *piconet* por sua vez se interliga uma à outra através de um dispositivo que participa de ambas (fazendo o papel de *bridge*). Conectando centenas de *piconets* dessa maneira (criando *scatternets*), uma grande distância poderia ser coberta até se alcançar pontos de concentração a partir dos quais os tráfegos agregados seriam escoados por qualquer solução de rede que fosse apropriada, destacando-se que esses pontos já não estariam mais na faixa de grande capilaridade, típica da “última milha”. Essas *scatternets*, dimensionadas e configuradas de maneira apropriada para transportar o tráfego previsto, poderiam cobrir áreas geográficas com alguns quilômetros de raio (conforme será visto em mais detalhes na seção 4.4).

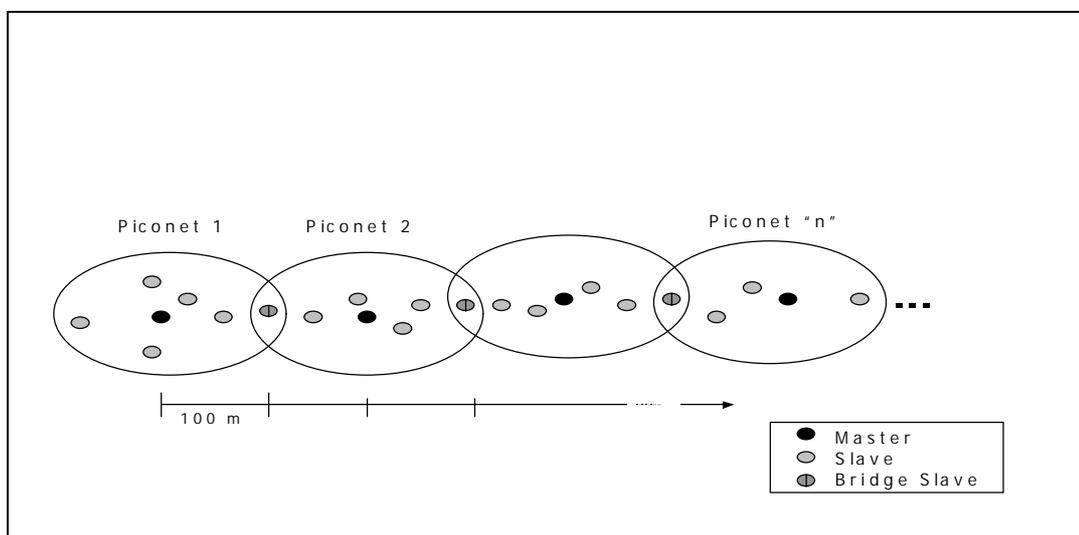


Figura 4.1: Dispositivos ao longo da linha de postes de energia formando uma *scatternet*

No caso de companhias que não têm ou não querem trabalhar com medidores eletrônicos colocados no poste, um cenário ligeiramente diferente pode ser oferecido. Basta considerar que os medidores de energia colocados nas residências seriam conectados a um dispositivo de

interconexão colocado no poste, ou ainda, que eles (os medidores residenciais) seriam diretamente interconectados uns aos outros. Em qualquer caso, todos eles estariam usando uma interface Bluetooth para comunicação.

Com relação à arquitetura e topologia da rede como um todo, a proposta considera uma rede de comunicação de dados organizada em dois níveis. O primeiro plano corresponde a uma rede sem fio baseada em Bluetooth e num segundo plano tem-se uma rede IP convencional. Conforme pode ser visto na figura 4.2, a rede Bluetooth interconecta todos os dispositivos de medição e controle da rede de energia elétrica através do uso de *scatternets*. Cada *scatternet* tem um nó concentrador, que é também um ponto de acesso para a rede IP (*gateway*). A rede IP será formada pelo conjunto de concentradores e pelos nós de processamento do sistema de telemetria (servidor central ou distribuído), dando suporte para as conexões de maior distância geográfica e maior volume de dados.

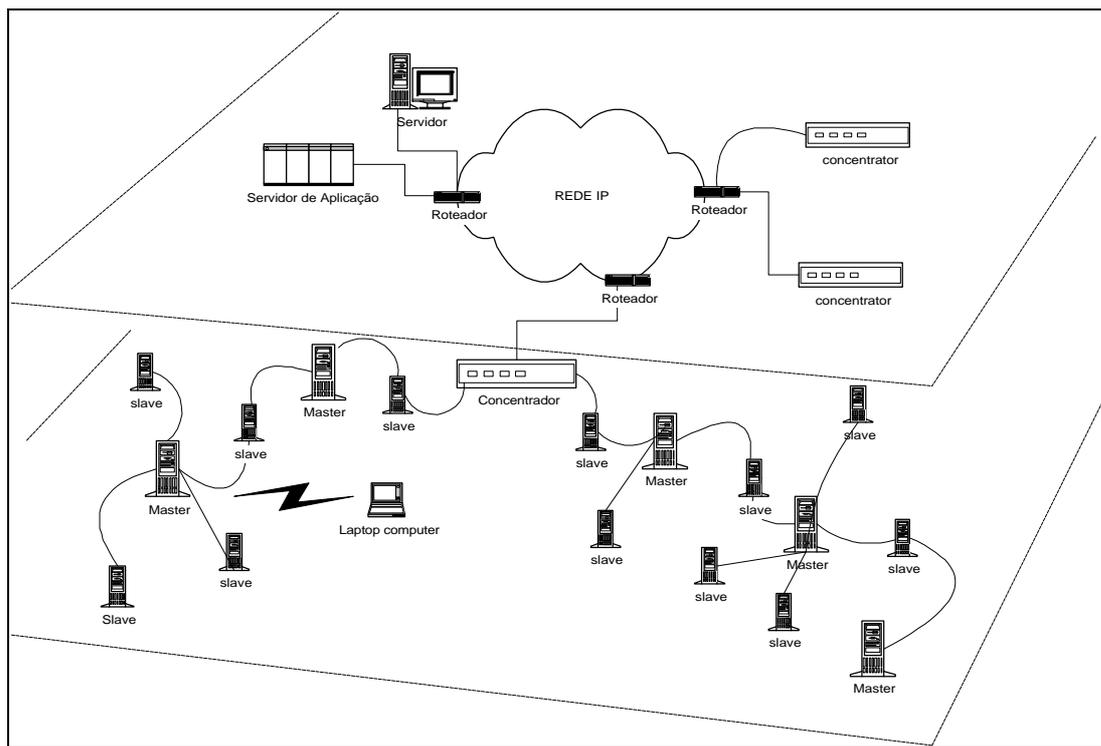


Figura 4.2: Arquitetura da rede mostrando segmentos de rede Bluetooth conectados num concentrador/gateway para uma rede IP em segundo plano

Desse modo, as mensagens oriundas dos medidores deverão fluir inicialmente através da rede Bluetooth, “saltando de poste em poste”, por assim dizer, até alcançar um concentrador com função de *gateway*. Esse último passa a mensagem para a rede IP, que se

encarrega de encaminhá-la até um servidor apropriado. De modo inverso, uma mensagem oriunda do sistema central para um medidor específico flui inicialmente pela rede IP até alcançar o concentrador/gateway que atende aquele medidor e a partir do concentrador segue pela rede Bluetooth até chegar ao medidor de destino.

Outra questão importante é a definição de qual a melhor topologia e forma de roteamento a serem utilizadas, especialmente no plano da rede Bluetooth (*scatternets*). Essa é, na verdade, uma questão para a qual ainda não existe solução padrão estabelecida na literatura. Conforme já mencionado no capítulo 3, existem diversas propostas de topologia e roteamento em *scatternets*, mas a maioria delas são orientadas para contextos diferentes, com frequência procurando tratar condições típicas de redes *ad hoc* móveis e *WPAN*, o que é coerente com o foco principal da tecnologia Bluetooth. Entretanto, o cenário de aplicação aqui considerado apresenta um aspecto particular, pois a rede de energia elétrica, se, por um lado, apresenta uma grande complexidade devido a sua grande dispersão geográfica, por outro lado, tem conexões estáveis (praticamente fixas/imóveis). Isso significa que, uma vez definida uma topologia e uma configuração apropriada para as conexões entre os dispositivos, as conexões serão estabelecidas e raramente alteradas ou desfeitas. Essa estabilidade de conexões não dispensa a existência de uma aplicação para mapeamento de dispositivos e conexões disponíveis em cada área geográfica e para estabelecimento das conexões conforme a topologia adotada. Mas certamente pode ser usada em benefício de maior simplicidade e eficiência nos procedimentos de roteamento e na própria definição da estrutura de formação da rede Bluetooth.

Um dos pontos fundamentais deste trabalho é justamente a definição de uma estrutura de *scatternet* e de um algoritmo de roteamento que sejam apropriados para garantir a troca de mensagens entre os dispositivos distribuídos ao longo da rede de energia elétrica e as aplicações do sistema de telemetria, localizadas em servidores conectados à rede IP ou em servidores móveis conectados à própria rede Bluetooth, com performance que seja coerente com as demandas do cenário de aplicação de referência. Portanto, dentre as diversas propostas de topologia e roteamento existentes na literatura Bluetooth, nenhuma solução em particular foi adotada, já que de modo geral todas elas estão orientadas para condições de uso bastante diferentes das que deverão ser encontradas no contexto do sistema de telemetria em consideração neste trabalho. Por se tratar de um novo cenário de uso de Bluetooth, a proposta de topologia e roteamento aqui apresentada foi desenvolvida de modo a se obter uma solução

de rede melhor adaptada aos requisitos e características desse cenário. Em seguida, a topologia e estrutura dessa rede e o algoritmo de roteamento de mensagens serão descritos com mais detalhes.

### 4.3. Topologia e Roteamento na Rede Bluetooth

Nesta seção serão abordados os principais aspectos relativos à topologia e estrutura da rede baseada no uso de *scatternets* Bluetooth, bem como a forma de roteamento de mensagens, caracterizando-se um Serviço de Rede Bluetooth (SRBT), que é uma proposta de interface padrão para ser utilizada pelas aplicações, de modo que elas possam trocar mensagens entre os diversos nós, sem ter que conhecer os detalhes da estrutura de rede e do algoritmo de roteamento adotado.

#### 4.3.1. Topologia e Estrutura

Esta proposta de topologia e estrutura para a rede Bluetooth que irá dar suporte ao sistema de telemetria para distribuição de energia elétrica considera que a região geográfica (urbana) a ser atendida pelo sistema seria dividida em áreas menores, com aproximadamente 4 a 16 Km<sup>2</sup>, numa estrutura análoga à das redes de telefonia celular. Em cada uma dessas áreas deverá existir um equipamento concentrador que fará o gerenciamento da rede Bluetooth em sua área. Esse equipamento deverá fazer também o armazenamento temporário dos dados de consumo e a função de *gateway* com a rede IP que interliga todos os concentradores com os servidores de aplicação do sistema de telemetria. Em razão das funções que deverá desempenhar, esse equipamento deverá ter um porte equivalente a um PC (sem monitor de vídeo) e, por conseqüência, um custo relativo muito mais elevado que os demais dispositivos da rede. Entretanto, considerando-se que uma área da ordem de 4 Km<sup>2</sup> abrange tipicamente de 12 a 16 mil medidores residenciais, tem-se uma quantidade suficientemente grande para diluir de forma atrativa os custos do equipamento concentrador, proporcionando um bom equilíbrio entre custo e desempenho da rede, e mantendo-se coerente com o objetivo de se obter uma rede *wireless* que dê cobertura na “última milha” com baixo custo.

Em cada área de uma região atendida pelo sistema, a rede baseada em Bluetooth terá uma estrutura ramificada, geralmente acompanhando o traçado das ruas da área em questão (ver figura 4.3). Essa estrutura, em forma de árvore, tem como raiz um concentrador contendo

um módulo Bluetooth. A partir do concentrador seriam estabelecidos segmentos de rede que interligam os demais dispositivos. Portanto, a origem da estrutura será sempre a *piconet* formada pelo concentrador e os dispositivos Bluetooth adjacentes que farão parte da infraestrutura de rede. Tipicamente existirão de 2 a 4 segmentos, variando principalmente em função do local escolhido para instalação do concentrador (no meio de uma quadra ou próximo de um cruzamento de ruas, por exemplo) e das características urbanas da área de cobertura que se pretende atingir. Entretanto, um concentrador poderá ter até 6 segmentos, facilitando desse modo o atendimento de situações específicas de traçados de ruas (uma rua que nasce na transversal de um cruzamento de outras duas ruas, por exemplo). Esse limite foi estabelecido de forma a garantir para cada segmento uma conexão permanentemente ativa com a *piconet* de origem da estrutura. Um endereço de *piconet* (AM\_ADDRESS) foi reservado para conexões de serviço. Cada segmento será composto de um *ramo primário* (porque tem origem na raiz, ou seja, no concentrador) e vários *ramos secundários* (que têm origem em nós pertencentes ao ramo primário), conforme pode ser visto na figura 4.3. Os ramos de um segmento serão compostos por uma seqüência de dispositivos Bluetooth classe 1, dispostos a uma distância máxima de 100 metros um do outro. Todos esses dispositivos estarão interconectados, começando pelo concentrador, cujo módulo Bluetooth desempenhará o papel de “*master*” da primeira *piconet*, e, seguindo-se a linha imaginária formada por um ramo primário, teríamos uma seqüência de dispositivos Bluetooth desempenhando, de forma intercalada, os papéis de “*slave*” (compartilhado) e “*master*” de sucessivas *piconets* formadas com os dispositivos adjacentes ao longo do ramo primário. Com essa alternância de papéis obtém-se uma sucessão de *piconets* parcialmente sobrepostas, com um dispositivo *slave* servindo de ligação (*bridge*) entre duas *piconets* adjacentes (ver figura 4.1). De modo semelhante serão interconectados também os dispositivos pertencentes a um ramo secundário. Nesse caso o nó de origem do ramo secundário será sempre um dispositivo já desempenhando o papel de “*master*” no ramo primário, sendo definido como uma “raiz secundária”. Um nó do tipo raiz secundária poderá dar origem para até 4 ramos secundários (embora tipicamente o mais comum seja 1 ou 2). Com esse limite fica garantida uma conexão permanentemente ativa para cada ramo secundário na *piconet* formada em torno da raiz secundária (onde mais 2 conexões são usadas para a ligação desse nó com seus adjacentes no ramo primário e um endereço é reservado para conexões de serviço). Dessa forma, todos os dispositivos de um segmento são interconectados, formando por assim dizer uma espécie de “cabo virtual

ramificado”. A interligação dos diversos segmentos através do concentrador permite a interconexão de todos os dispositivos de uma área, formando uma grande *scatternet*. Essa *scatternet* irá constituir uma estrutura básica de rede que servirá para interligação de centenas de outros dispositivos, com interface de comunicação Bluetooth, que estiverem dispostos ao longo da área coberta por essa estrutura. Esses outros dispositivos deverão ser organizados em grupos (“*clusters*”) e então conectados (via *park mode*) a um nó da estrutura principal, o que estiver mais próximo ou o que for mais conveniente, compartilhando um mesmo endereço de *piconet* (AM\_ADDRESS) de forma alternada entre eles.

A figura 4.3 ilustra a cobertura de uma pequena área geográfica, composta de algumas ruas e quadras com traçado regular, à exceção de uma que mostra o caso de uma rua transversal. Observa-se que a cobertura completa da área nesse caso é alcançada com a sobreposição parcial dos ramos secundários de dois segmentos diferentes, cujos ramos primários estão dispostos de forma ortogonal entre si. Os demais dispositivos existentes seriam agrupados e interconectados em pontos convenientes da estrutura principal.

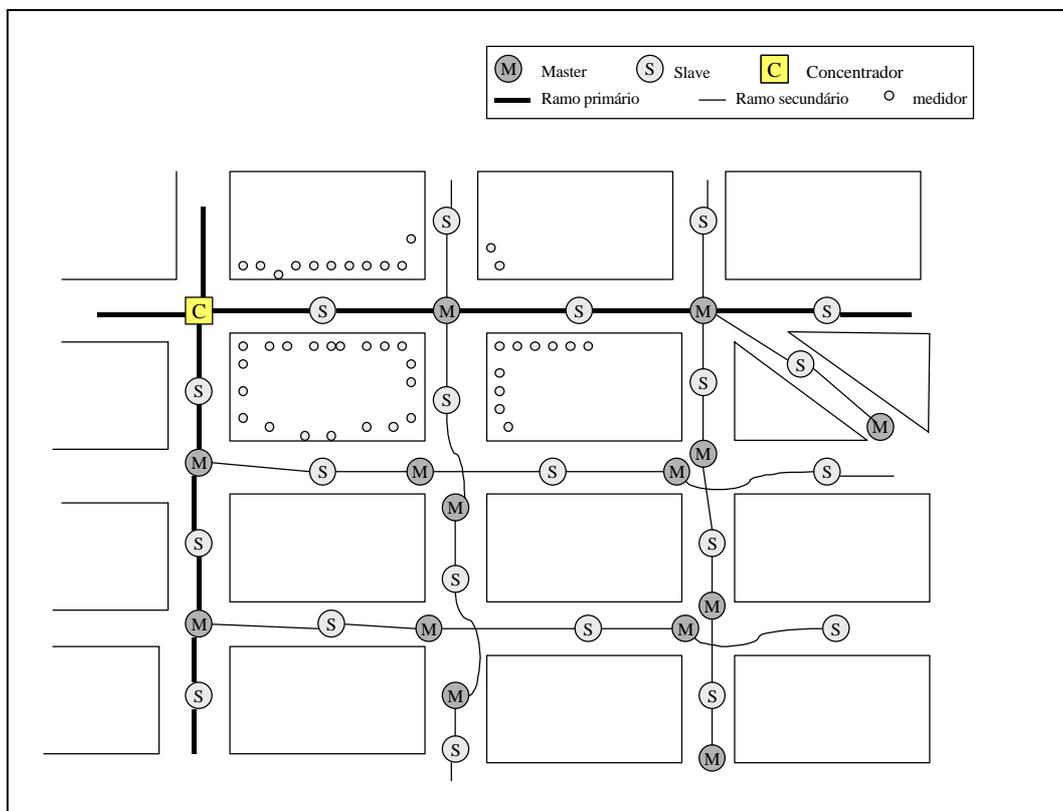


Figura 4.3: Estrutura da rede Bluetooth cobrindo algumas quadras

A figura 4.4 a seguir coloca em destaque a representação da árvore correspondente a estrutura de rede cujo mapeamento geográfico foi ilustrado na figura 4.3. Observa-se que a raiz da árvore é determinada pelo concentrador, a partir do qual, nesse caso, têm origem dois segmentos (uma sub-árvore à esquerda e uma sub-árvore à direita). Destaca-se o caminho que corresponde ao ramo primário de cada segmento, observando-se que é composto por uma sucessão de nós que representam alternadamente um *slave* e um *master*. Nota-se também que todo *slave* é sempre um nó de grau 1 (que tem apenas um nó “filho”) no máximo e que somente os nós tipo *master* que fazem parte do caminho que compõe um ramo primário podem ter grau  $>1$ , porém  $<7$ . Observa-se ainda que a aparência da árvore (quantidade de sub-árvores, balanceamento e profundidade) dependerá muito do traçado urbano da região onde a rede Bluetooth vai ser implantada e da estratégia adotada no projeto de delimitação das áreas de cobertura.

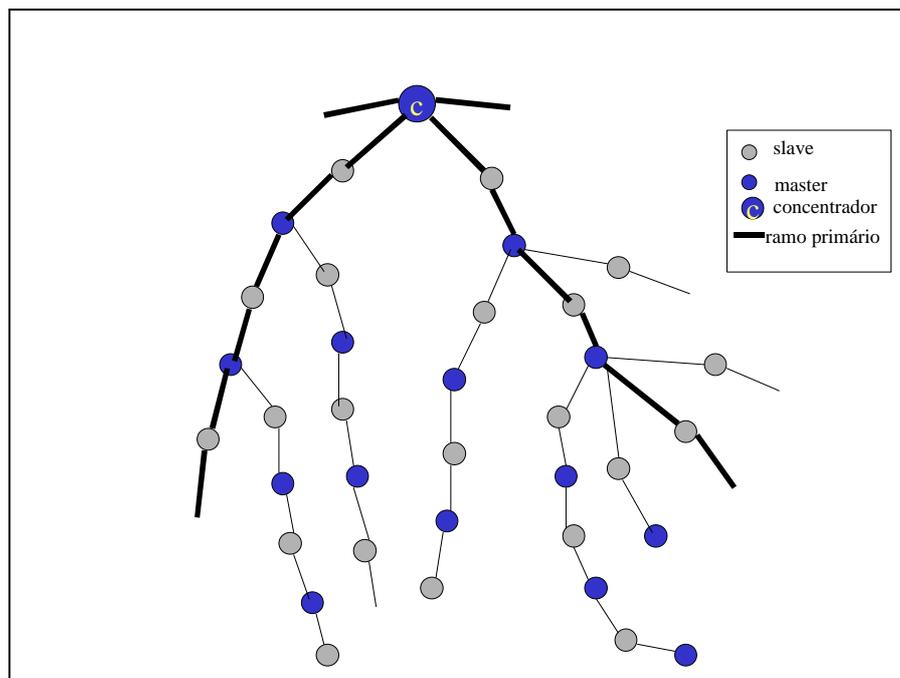


Figura 4.4. Árvore correspondente uma rede Bluetooth de uma área

Numa situação típica, considerando-se um loteamento regular como o ilustrado na figura 4.3, com 30 a 40 lotes/casas por quadra, cada ramo primário poderia ter aproximadamente 1 Km de extensão, e cobrir cerca de 9 a 10 quadras. Portanto, uma área com cerca de 3 a 4 mil medidores de energia em média. Nesse exemplo, cerca de 360 a 400 dispositivos Bluetooth seriam usados para compor a estrutura básica da rede que daria cobertura de comunicação nessa área. Num cenário em que se adote como opção colocar os

medidores eletrônicos nas residências, com um dispositivo Bluetooth para cada medidor, deve-se considerar mais 3 a 4 mil dispositivos, que estariam se conectando à estrutura básica. Já num cenário em que se adote medidores múltiplos colocados diretamente nos postes, considerando-se uma média de 4 ligações por poste, seriam necessários mais 390 a 600 dispositivos, totalizando cerca de 750 a 1000 dispositivos em toda a rede (ou seja, um dispositivo Bluetooth para cada medidor múltiplo contemplando em média 4 residências cada um). Se for considerado que um concentrador poderia ter mais dois ramos primários de igual porte, numa configuração em estrela (considere na figura 4.3 a expansão dos ramos apenas iniciados acima e a esquerda do concentrador), então estaria sendo coberta uma área de aproximadamente 4 Km<sup>2</sup>, podendo envolver algo como até 12 a 16 mil medidores interligados, supondo-se o cenário em que os medidores ficam nas residências. Ampliando-se essa estrutura pelo uso de ramos primários e secundários de aproximadamente 2 Km de extensão cada um, uma área ainda maior (com 16 Km<sup>2</sup> aproximadamente) poderia ser estabelecida, abrangendo cerca de 64 mil medidores interligados a um mesmo concentrador.

Estimativas iniciais indicam que áreas como essas, abrangendo de 4 a 16 Km<sup>2</sup> aproximadamente e cerca de 16 a 64 mil medidores respectivamente, podem ser atendidas com folga por um concentrador, com um único módulo Bluetooth, considerando-se que a coleta de dados de consumo seja feita com a frequência de 1 registro (80 bytes) a cada 10 minutos por medidor. Essa é a frequência de coleta assumida como requisito mínimo para o sistema de telemetria, mas na verdade, para configurações desse porte a solução de rede proposta poderia atender frequências ainda mais elevadas, se necessário, conforme dados apresentados na seção 4.4 deste capítulo. Observe-se que essa é uma configuração típica que já atende os requisitos básicos do sistema de referência e, portanto, alcança o objetivo de oferecer uma alternativa de rede *wireless* de baixo custo para cobertura da “última milha”.

Devido ao fato de que o traçado urbano nem sempre será tão regular (estilo Manhatan) quanto o que foi apresentado na figura 4.3, a delimitação de uma área específica poderá assumir uma aparência diferente dessa configuração típica. Entretanto, a estrutura em árvore, com o concentrador sendo a sua raiz, tal como proposto, oferece flexibilidade para compor áreas de cobertura de tamanhos variados e com formatos irregulares, de modo a permitir sua adaptação a qualquer traçado de ruas e quadras, desde os loteamentos planejados até áreas em que a ocupação ocorreu de forma totalmente desordenada. Um dos principais fatores limitantes que afetam o tamanho de cada área atendida por um concentrador têm

relação com o volume de tráfego total a ser suportado e com a extensão das rotas de maior tráfego, pois o retardo de rede será tanto maior quanto mais extensa for a rota (conforme pode ser visto na seção 4.4 deste capítulo). O volume de tráfego por sua vez está ligado com a densidade de pontos de fornecimento de energia (quantidade de medidores) e a frequência de coleta de registros de consumo pretendida para a área.

É interessante observar que na parte estrutural da rede Bluetooth, as diversas *piconets* são interconectadas sempre através de dispositivos que desempenham o papel de “*bridge*” na forma de “*slave* compartilhado”, ao invés da forma “*master/slave*”, em que o dispositivo “*bridge*” faz alternância de papel. O procedimento de troca dos papéis *master* e *slave* entre dois dispositivos Bluetooth consome um tempo relativamente alto, que pode se tornar crítico se for repetido com muita frequência. Além disso, cada dispositivo “*bridge*” é um *slave* compartilhado por apenas duas *piconets* diferentes, o que facilita o gerenciamento de “presença” em cada *piconet* e evita que esse dispositivo se torne um gargalo. De um modo geral essas características garantem melhor desempenho para uma rede Bluetooth baseada em *scatternets*, conforme mencionado no capítulo 3.

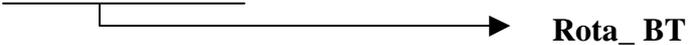
#### 4.3.2. Roteamento de Mensagens

Outro fator importante é a forma de roteamento de mensagens a ser utilizada na rede Bluetooth. A aplicação de telemetria que está sendo usada como referência (descrita na seção 4.1) tem como característica um maior volume de tráfego oriundo dos medidores de energia para os concentradores e destes para um servidor central, através da rede IP. O tráfego em sentido inverso deverá existir, mas em volume bem menor. Eventualmente poderá haver também algum tráfego entre dois nós da rede Bluetooth, como, por exemplo, na eventual conexão temporária de um dispositivo móvel para suportar serviços de manutenção em campo. Por essa razão, para se alcançar maior generalidade na solução que está sendo proposta, considera-se que qualquer dispositivo da rede poderá enviar mensagens para qualquer outro dispositivo da rede, independente de sua localização. Para tanto, cada dispositivo da rede Bluetooth deverá ter um endereço de rede próprio.

Considerando que o cenário de aplicação que está sendo visado tem como características a grande previsibilidade e estabilidade das conexões (ao contrário das redes ad hoc móveis), o esquema de endereçamento está baseado na própria topologia de rede adotada. Dessa forma, os dispositivos pertencentes a um ramo primário serão numerados em ordem

ascendente (deslocamento relativo primário) a partir do concentrador (raiz primária). De modo semelhante, os dispositivos pertencentes a um ramo secundário serão numerados em ordem ascendente (deslocamento relativo secundário) a partir de sua origem no ramo primário (raiz secundária). Essa numeração relativa, tanto para os nós do ramo primário quanto para os nós do ramo secundário, será feita em múltiplos de 10 para permitir a eventual inserção de nós adicionais no meio de um ramo sem necessidade de alterar a numeração dos demais dispositivos. O mesmo processo se repete para cada segmento ligado a um mesmo concentrador. E os concentradores, por sua vez, terão também uma identificação própria na rede Bluetooth. A partir dessa base, será adotado um esquema de endereçamento hierárquico, que tem a seguinte forma:

$$\text{End\_Rede\_BT} = \text{Cg.Rx.Dx.Ry.Dy} + \text{Eq\_Id}$$



Onde:

**Cg** = Nº do Concentrador/gateway, com 2 bytes.

**Rx** = Nº do Segmento, ou Ramo Primário, com 4 bits.

**Dx** = Deslocamento relativo primário, com 12 bits.

**Ry** = Nº do Ramo secundário, com 4 bits.

**Dy** = Deslocamento relativo secundário, com 12 bits.

**Eq\_Id** = Identificação do Equipamento, com 32 bits, composto de:

- tipo\_de Equipamento, com 4 bits
- número\_do Equipamento, com 28 bits.

Conforme esquema acima, um **End\_Rede\_BT** terá ao todo 10 bytes. A primeira parte do endereço (com 6 bytes) representa a rota para se atingir um determinado nó estrutural no contexto da rede Bluetooth. Em alguns casos isso seria suficiente para se atingir o destino final da mensagem. Entretanto, em muitos casos um dispositivo Bluetooth estará sendo usado como porta de comunicação compartilhada por vários medidores (caso do medidor múltiplo colocado no poste, ou do dispositivo que lidera um “cluster” de medidores). Por essa razão torna-se necessário o uso da segunda parte do endereço, o **Eq\_Id** (com 4 bytes), que distingue um dispositivo dentre os demais dispositivos que usam o mesmo nó estrutural como porta de acesso à rede Bluetooth. Portanto, cada dispositivo componente da rede Bluetooth deverá manter uma *lista de dispositivos associados* (medidores ou outros tipos de equipamentos) aos

quais serve como porta de acesso à rede. Essa lista poderá incluir dispositivos ditos *locais* (que estão fisicamente acoplados) ou *remotos* (que são acessíveis via uma conexão Bluetooth). No último caso a lista conterà o “BD\_ADDR” (*Bluetooth Device Address*) ou “PM\_ADDR” (*Park Member Address*) do dispositivo remoto correspondente.

Cada concentrador terá ainda um endereço IP associado, que o identificará no contexto da rede IP. Essa associação será mantida num servidor central. Além disso, será também mantida no servidor central uma associação entre a Identificação de Equipamento (**Eq\_Id**) e a sua **Rota\_BT** correspondente na rede Bluetooth. Dessa forma, para se enviar uma mensagem do servidor central para um equipamento qualquer da rede Bluetooth será necessário obter a sua **Rota\_BT** e com base no **Cg** obter o endereço IP correspondente ao concentrador destino. Feito isso, basta encapsular a Mensagem + **End\_Rede\_BT** num pacote IP destinado ao concentrador. O concentrador por sua vez ao receber o pacote IP, retira a Mensagem e a encaminha na rede Bluetooth para o destino final através da **Rota\_BT** indicada, conforme algoritmo de roteamento que será descrito a seguir. As mensagens oriundas da rede Bluetooth que precisem ser encaminhadas para a rede IP serão encapsuladas num pacote IP pelo concentrador/gateway, a quem caberá também obter o endereço IP correspondente (do servidor central ou do concentrador destino).

As mensagens na rede Bluetooth serão formatadas e encaminhadas com base em um quadro básico, cujos principais campos são mostrados na figura 4.5, considerando-se que:

- *End\_Destino* e *End\_Origem* têm a estrutura de um **End\_Rede\_BT**;
- *Tipo\_Quadro* é usado para controle, sendo composto basicamente de:
  - *Tipo de Msg*: D (mensagem de dados), B (mensagem de *broadcasting*), C (reservado para mensagem de controle)
  - *Prioridade*: 5 (normal.), 1(alta);
- *Tam\_Msg* indica o tamanho em bytes da mensagem de aplicação;

*Msg\_Aplic* é a mensagem de aplicação propriamente dita (payload).

End_Destino	End_Origem	Tipo_Quadro	Tam_Msg	Msg_Aplic
-------------	------------	-------------	---------	-----------

Figura 4.5: Estrutura básica de um quadro para roteamento na rede Bluetooth

Deve-se observar ainda que o conteúdo de alguns campos tem significado especial quando tomam o valor zero. Por exemplo, se *End\_Destino* tiver um **Cg** igual a zero, num quadro tipo “D” ou “C”, isso indica que o destino da mensagem é o servidor central. Já se o quadro for do tipo “B”, o campo **Cg** igual a zero indica um *broadcasting* para toda a rede. E, como regra geral, indica-se o escopo de uma mensagem tipo *broadcasting* definindo-se no *End\_Destino* o componente da estrutura que corresponde à abrangência desejada (concentrador, segmento, ramo primário, ramo secundário), e zerando-se os campos subsequentes na hierarquia de endereçamento que compõe um **End\_Rede\_BT**.

O roteamento de mensagens na rede Bluetooth é sem dúvida um aspecto crítico, devido ao porte da *scatternet* necessária para dar cobertura à área geográfica típica a ser atendida por um concentrador. A estrutura adotada procura otimizar a quantidade de nós intermediários entre um ponto  $k$  qualquer e o concentrador (nó raiz). Por essa razão está sendo previsto o uso de dispositivos Bluetooth classe 1, dispostos de forma a se cobrir o máximo de distância com a menor quantidade possível de nós, de modo a se estruturar rotas de rede por onde as mensagens possam fluir mais rapidamente. Ainda assim, para uma área típica, com cerca de 4 Km<sup>2</sup>, estar-se-á lidando com rotas que envolvem em média 20 saltos, podendo chegar a 40 saltos, até que uma mensagem oriunda de um ponto  $k$  qualquer dentro da própria área alcance o seu concentrador. Para mensagens de um ponto  $k$  qualquer para um ponto  $j$  qualquer, onde  $k$  e  $j$  pertencem a segmentos diferentes da mesma área, ter-se-á tipicamente uma média de 40 saltos, podendo chegar a 80 saltos, se os dois pontos estiverem em extremos opostos. Num contexto como esse, é fundamental que o algoritmo de roteamento seja ao mesmo tempo simples e eficiente, para não causar ainda mais impacto no desempenho geral da rede.

Esta proposta de roteamento busca atender esses requisitos permitindo que qualquer mensagem seja adequadamente encaminhada sem fazer uso de tabelas de roteamento, que implicariam em maior tempo de processamento (para usar e manter as tabelas) e mais espaço de armazenamento em cada dispositivo da rede. Com o mesmo propósito, evita-se também o uso de algoritmos do tipo “*dynamic source routing protocol*” [BHA99], pois a quantidade média de endereços que necessitaria ser transportada junto da mensagem causaria um *overhead* inadmissível e as vantagens de dinamicidade que essa abordagem proporciona,

muito interessante para cenários de redes ad hoc, não é requerida pelo cenário de referência, que apresenta um contexto altamente estável e previsível.

O algoritmo de roteamento que está sendo proposto leva em consideração que a *scatternet* que dará cobertura a uma determinada área será formada de modo planejado, obedecendo algumas regras pré-estabelecidas, resultando numa estrutura em árvore com formato dentro de certas características, que por sua vez estarão refletidas na própria estrutura de endereçamento adotada, conforme já foi visto anteriormente. Desse modo, qualquer nó  $k$  pertencente à estrutura dessa rede Bluetooth poderá rotear uma mensagem destinada a outro nó  $d$  qualquer, apenas com base na análise do **End\_Rede\_BT** de destino com relação ao próprio **End\_Rede\_BT** do nó  $k$  corrente. Ou seja, como a estrutura da rede é conhecida e o esquema de endereçamento adotado reflete uma posição nessa estrutura, conhecendo-se o endereço de destino e o endereço do nó corrente, o caminho a partir dele até o destino pode ser determinado e a mensagem encaminhada.

O esquema básico dessa proposta de algoritmo de roteamento de mensagens na rede Bluetooth é apresentado a seguir através de um pseudocódigo, omitindo-se detalhes e condições de exceção. Para tanto algumas definições devem ser consideradas:

**Raiz primária** => campos **Rx.Dx.Ry.Dy** igual a zeros (=concentrador)

**Raiz secundária** => campos **Ry.Dy** igual a zeros (posição em ramo primário)

**Nó\_Corrente** => nó que está processando a mensagem, representado pelo seu seu **End\_Rede\_BT**.

**Nó\_Anterior** => nó de rede que antecede (“pai”) o **Nó\_Corrente** na estrutura de árvore que mapeia a rede Bluetooth, representado por um **End\_Rede\_BT**.

**Nó\_Posterior** => nó de rede que sucede (“filho”) o **Nó\_Corrente** na estrutura de árvore que mapeia a rede Bluetooth, representado por um **End\_Rede\_BT**. Se o **Nó\_Corrente** estiver localizado em um ramo primário (ou seja, se for uma raiz secundária) e possuir vários nós subordinados (vários “filhos”) então será considerado **Nó\_Posterior** aquele nó subordinado que também está localizado no ramo primário (ou seja, cujos campos **Ry.Dy**=zeros).

**MSG** => mensagem normal, exceto *broadcasting*.

Assim, o algoritmo de roteamento para quadros tipo “D” ou “C” é dado por:

<p><b>Proc. para Nó_Corrente qualquer, exceto Raiz primária ou Raiz Secundária:</b></p> <p>Se Cg_Destino = Cg_Corrente  E Rx_Destino = Rx_Corrente  E Ry_Destino = Ry_Corrente  <u>então:</u> /*destino é no mesmo ramo secundário*/  Se Dy_Destino &gt; Dy_Corrente <u>então:</u> rotear MSG para Nó_Posterior  Se Dy_Destino &lt; Dy_Corrente <u>então:</u> rotear MSG para Nó_Anterior  Se Dy_Destino = Dy_Corrente <u>então:</u> executar Entrega_MSG  <u>senão:</u> /*destino em outro ramo ou concentrador*/  rotear MSG para Nó_Anterior</p> <p><b>Proc. para Nó_Corrente = Raiz Secundária /* Nó localizado num ramo primário*/</b></p> <p>Se Cg_Destino = Cg_Corrente E Rx_Destino = Rx_Corrente  <u>então:</u> /*destino é no mesmo segmento*/  Se Dx_Destino &gt; Dx_Corrente <u>então:</u> rotear MSG para Nó_Posterior  Se Dx_Destino &lt; Dx_Corrente <u>então:</u> rotear MSG para Nó_Anterior  Se Dx_Destino = Dx_Corrente  <u>então:</u>  Se Ry_Destino = Ry_Corrente /* igual a zero*/  <u>então:</u> executar Entrega_MSG  <u>senão:</u> /* destino está num dos ramos secundários deste nó */  Rotear MSG para nó subordinado cujo Ry = Ry_Destino  <u>senão:</u> /*destino em outro segmento ou concentrador */  rotear MSG para Nó_Anterior</p> <p><b>Proc. para Nó_Corrente = Raiz Primária /* Concentrador */</b></p> <p>Se Cg_Destino = Cg_Corrente  <u>então:</u> /* destino no mesmo concentrador */  Se Rx_Destino = Rx_Corrente /* igual a zero */  <u>então:</u> executar Entrega_MSG  <u>senão:</u> /* destino está num dos ramos primários deste nó */  Rotear MSG para nó subordinado cujo Rx = Rx_Destino  <u>senão:</u> /* destino no servidor central ou em outro concentrador */  encapsular MSG em pacote IP  encaminhar pacote IP para servidor central</p> <p><b>Proc. Entrega_MSG:</b></p> <p>Verificar se a <i>tabela de dispositivos associados</i> do Nó_Corrente possui uma entrada que corresponda ao Eq_Id_Destino.</p> <p>Se não possuir uma entrada correspondente, então a MSG deverá ser descartada (com ou sem resposta à origem), pois a identificação de equipamento não é válida.</p> <p>Se possuir uma entrada igual Eq_Id_Destino, então entregar a MSG através de procedimento apropriado, conforme seja o equipamento um dispositivo <i>local</i> ou <i>remoto</i>. Se for local significa que a MSG será encaminhada para alguma interface física acoplada ao próprio equipamento correspondente ao Nó_Corrente. E a MSG está entregue. Se for remoto, significa que a MSG será encaminhada via aérea para o dispositivo Bluetooth indicado na tabela de dispositivos associados, até encontrar o dispositivo que contém na sua tabela o Eq_Id_Destino como equipamento <i>local</i>.</p> <p>Tendo alcançado o seu destino final, a MSG será repassada para uma aplicação apropriada para ser devidamente processada.</p>
---

O algoritmo apresentado na forma acima destaca os procedimentos relativos à posição em que se encontra o nó corrente na estrutura da rede Bluetooth, ou seja, se ele é um nó localizado numa raiz primária (concentrador), num ramo primário (raiz secundária) ou numa

outra posição qualquer. Essa forma de apresentação foi adotada apenas para facilitar a visualização e compreensão do algoritmo. Uma implementação do mesmo deve considerar que se trata de um único algoritmo, comum a todos os nós estruturais da rede Bluetooth. Nesse caso, os comentários relativos às possíveis posições do nó corrente (raiz primária, raiz secundária, qualquer) seriam substituídos por fluxo de controle de decisão permitindo a execução do trecho adequado a partir da determinação da posição pela análise do seu próprio endereço de rede (**End\_Rede\_BT**).

O tratamento de mensagens do tipo broadcasting não será detalhado aqui, mas o algoritmo consiste basicamente em fazer com que a mensagem seja replicada para todos os nós de rede com o qual cada nó está conectado, exceto para aquele de onde a mensagem foi recebida, observando-se ainda o escopo pretendido para o broadcasting, que pode envolver toda a rede ou apenas parte dela, conforme estiver indicado nos campos que compõem o *End\_Destino*. Esse procedimento, executado sobre uma estrutura em árvore, garante que uma (e somente uma) cópia da mensagem será encaminhada para todos os nós requeridos, evitando-se saturar a rede com mensagens desnecessárias. Dessa forma, por exemplo, uma mensagem para todos os nós que compõem a área de abrangência de um concentrador pode ser fácil e eficientemente encaminhada, gerando o menor *overhead* possível sobre a rede.

#### 4.3.3. Serviço de Rede Bluetooth

A arquitetura proposta é de que o roteamento de mensagens seja implementado como uma camada de serviço, posicionada entre a aplicação e as camadas de nível inferior da pilha de protocolos da tecnologia Bluetooth, conforme mostrado na figura 4.6, onde essa camada de serviço é identificada como SRBT, de Serviço de Rede Bluetooth.

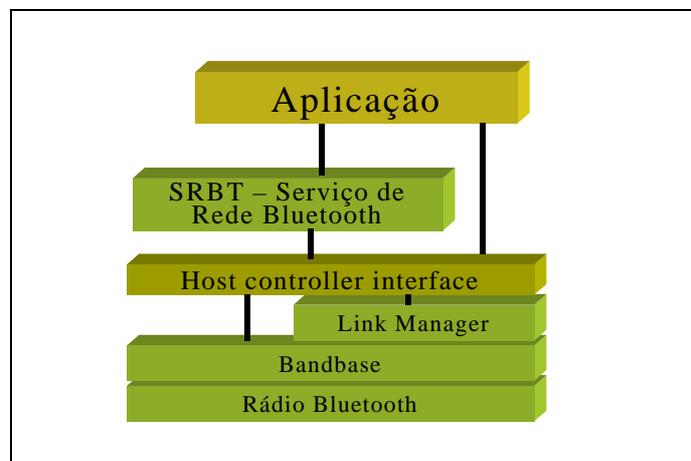


Figura 4.6: Arquitetura do Serviço de Rede Bluetooth (SRBT)

As aplicações teriam acesso aos serviços dessa camada de roteamento em rede Bluetooth através de uma interface comum, cujas principais primitivas, para uma implementação de serviço não-orientado à conexão, seriam as seguintes:

Primitiva	Parâmetros	Função
<SEND_MSG>:	Msg_Aplic; End_Destino; Prior_Msg; Tam_Msg;	Enviar uma mensagem para um determinado equipamento na rede Bluetooth (sem confirmação de entrega).
<SEND_Broad_MSG>:	Msg_Aplic; Escopo_Destino; Prior_Msg; Tam_Msg	Enviar uma mensagem tipo <i>broadcasting</i> para um determinado conjunto de equipamentos da rede Bluetooth (sem confirmação de entrega).
<GET_MSG>:	Msg_Aplic; End_origem; Prior_Msg; Tam_Msg;	Obter uma mensagem, normal ou tipo <i>broadcasting</i> , que foi recebida através da rede Bluetooth.
<GET_ADDRESS>:	Eq_Id End_Rede_BT	Obter o End_Rede_BT (Rota_BT) que corresponde ao equipamento cujo Eq_Id foi informado pela aplicação.
<INIT_APLIC>:	Aplic_Id; Params;	Inicializar uma aplicação de gerenciamento de mensagens no contexto do Serviço de Rede Bluetooth. Os parâmetros devem adequados ao ambiente de implementação.
<END_APLIC>:	Aplic_Id; Params;	Encerra uma aplicação de gerenciamento de mensagens no contexto do Serviço de Rede Bluetooth.

Com base nas primitivas acima, a camada de serviço proposta (SRBT) garante o encaminhamento apropriado das mensagens na rede Bluetooth, dentro do conceito de “melhor esforço”. Mas não pode garantir a entrega efetiva em todos os casos. O tratamento adequado para a hipótese de uma eventual perda de mensagem na rede Bluetooth deve ficar ao encargo da aplicação. Portanto, para um melhor uso desse serviço de roteamento, as aplicações

tipicamente adotariam um esquema *cliente-servidor*. Nesse esquema normalmente é definido um conjunto de mensagens que correspondem não somente às solicitações que devem ser tratadas e suas respectivas respostas, mas também às condições de exceção que podem ocorrer, de forma a se manter pleno controle da situação. Esse conjunto de mensagens pode ser tratado por uma aplicação genérica de gerenciamento de mensagens ou diretamente por uma aplicação específica.

Assim, considere-se, por exemplo, no contexto de referência, que uma aplicação A\_Cliente, rodando em um dispositivo da rede, envia para a aplicação A\_Servidor, rodando em outro dispositivo, uma mensagem cujo conteúdo solicita que o “registro de medição de energia” do medidor “x” seja enviado para a aplicação A\_Cliente. A aplicação A\_Servidor obtém os dados requeridos, formata a mensagem e a envia para o dispositivo que fez a solicitação. Em ambos os casos, as aplicações se relacionam localmente, em seus respectivos dispositivos, com a camada de Serviço de Rede Bluetooth (SRBT), conforme ilustrado pela figura 4.7. O serviço SRBT providencia para que as mensagens sejam encaminhadas através

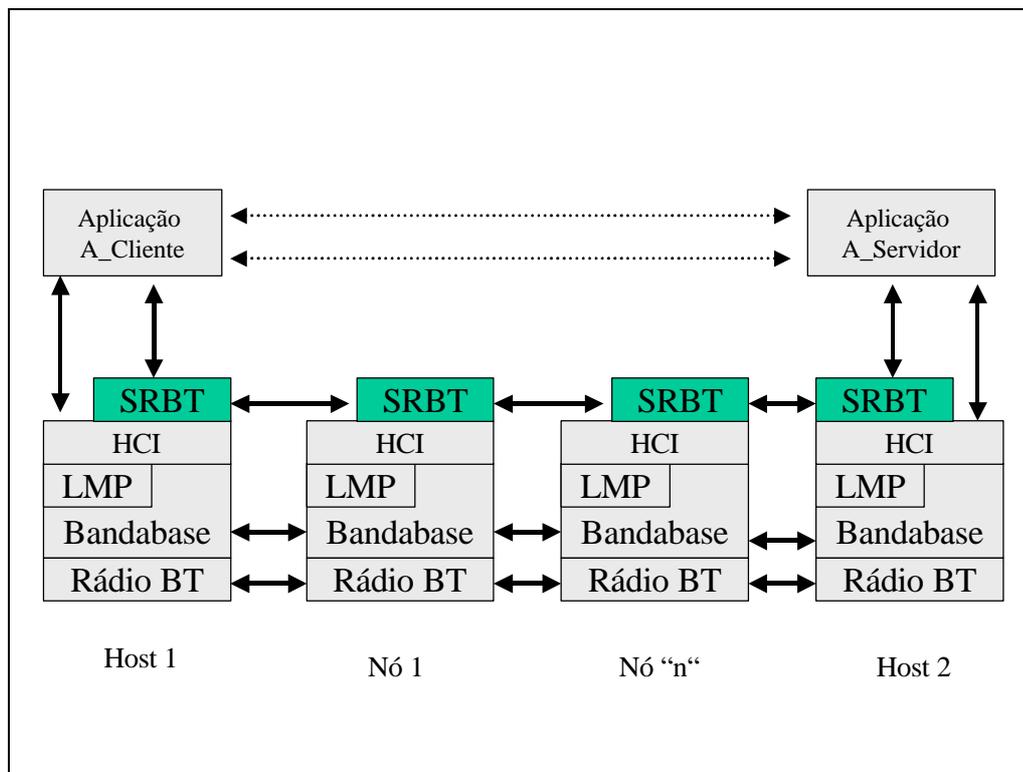


Figura 4.7: Esquema de uso do serviço de rede Bluetooth (SRBT)

da rede Bluetooth, desde o dispositivo de origem até o dispositivo de destino, passando por todos os nós intermediários que forem necessários. Para tanto, o serviço SRBT confia nos recursos oferecidos pelos protocolos das camadas inferiores da pilha de protocolos Bluetooth, que possuem mecanismos de garantia de confiabilidade de transmissão. Entretanto, se, eventualmente, houver alguma falha de comunicação em algum enlace que faz parte da rota, que não possa ser recuperada pelo protocolo Bandabase, uma mensagem poderá deixar de ser entregue ao destino. Se essa hipótese ocorrer, caberá à aplicação envolvida adotar o procedimento de tratamento de exceção que for mais adequado para cada situação específica (por exemplo, enviar uma nova mensagem de solicitação, decorrido um determinado tempo sem que haja uma resposta apropriada do outro lado, ou, simplesmente desistir da solicitação).

A definição de um serviço não-orientado à conexão tem o efeito de transferir alguma carga de controle para as camadas superiores (nesse caso, para as aplicações), entretanto, essa forma de operação torna o serviço de rede muito mais simples e mais eficiente. Características particularmente importantes para o cenário de referência, que envolve uma rede de grande abrangência, com uma quantidade média de nós intermediários relativamente alta, mas que deve estar baseada em dispositivos pequenos e de baixo custo.

Um serviço como proposto no SRBT é de grande utilidade para o desenvolvimento de aplicações, já que elimina a necessidade de implementar os algoritmos de encaminhamento de mensagens na rede Bluetooth na própria aplicação. Basta fazer uso da interface do serviço, que torna a estrutura da rede transparente para a aplicação. Isso significa não somente mais facilidade de desenvolvimento, mas principalmente maior confiabilidade.

Além disso, apresenta a vantagem de permitir que novas funcionalidades sejam incorporadas ao serviço sem afetar de forma direta as aplicações já existentes.

#### **4.4. Volume de Dados e Capacidade da Rede Bluetooth**

Foi visto nas seções anteriores deste capítulo que a rede Bluetooth que deverá dar suporte ao sistema de telemetria de distribuição de energia elétrica será composta por um conjunto de *scatternets* formadas em torno de equipamentos concentradores, cada uma delas cobrindo uma determinada área da região a ser atendida pelo sistema. Foi mencionado também que uma estrutura típica da rede Bluetooth proposta para essas áreas seria formada por um concentrador e 4 segmentos, numa topologia em estrela, com cada segmento tendo aproximadamente 1 a 2 Km de extensão (tanto para os ramos primários quanto para os ramos

secundários). Isso equivale a uma área que pode ter de 4 a 16 Km<sup>2</sup> de abrangência. Diversos fatores devem ser considerados para a delimitação dessas áreas, dentre os quais destacam-se:

- as características de traçado urbano da região,
- a sua densidade de residências (leia-se de pontos de fornecimento de energia),
- a frequência de coleta de registros de consumo,
- e, principalmente, a capacidade de tráfego da rede Bluetooth correspondente a cada concentrador.

Nesta seção será examinada em mais detalhe a questão da capacidade da rede Bluetooth diante dos volumes de dados a serem transportados em cada área. Em resumo, busca-se aqui uma resposta para a seguinte questão: qual a quantidade de medidores que pode ser interligada em um único concentrador?

O concentrador é o ponto crítico da rede devido à topologia adotada e principalmente ao perfil de tráfego previsto para o sistema de telemetria referido. Perfil este caracterizado pela função de coleta continuada de consumo de energia, que faz com que o maior volume de dados seja dirigido dos medidores para o concentrador (e deste para a rede IP).

Portanto, pode-se considerar que o principal fator limitante é a capacidade de transmissão de dados da *piconet* formada em torno do concentrador. E ainda, que o pico de volume de dados que essa *piconet* deverá receber pode ser representado em função da quantidade de medidores existentes na área e da frequência estabelecida para a função de coleta continuada de consumo de energia.

Dessa forma, a avaliação que se segue procura determinar a quantidade de medidores suportada por um concentrador com base em dois parâmetros fundamentais, que são a taxa de chegada de dados ao concentrador e o tempo de retardo acumulado na rede, observando-se as seguintes regras:

- A *taxa de chegada de dados* ao concentrador não deve ultrapassar a capacidade máxima de transmissão de dados da *piconet* formada em torno do mesmo. Essa taxa representa, em Kbps, o volume total de dados gerado pelas mensagens enviadas através da rede Bluetooth, em direção ao concentrador, em cada ciclo de coleta de registros de consumo de energia.
- O *tempo de retardo acumulado na rede* deve ser inferior ao tempo estabelecido como intervalo entre cada ciclo de coleta de registros de consumo de energia. Esse tempo de retardo compreende o tempo de transmissão das mensagens

contendo o registro de consumo de energia de cada medidor através de sucessivos nós da rede Bluetooth, desde o nó de origem até o concentrador, e o tempo de espera em cada nó da rede, que representa outros fatores que aumentam o retardo.

A observação dessas regras é necessária para evitar uma saturação da rede Bluetooth em decorrência da introdução de um volume de mensagens superior a sua capacidade de escoamento.

A capacidade máxima de transmissão de dados de uma *piconet*, conforme visto no capítulo 3, varia em função de diversos fatores. Para um canal de dados tipo ACL, simétrico, com pacotes tipo DH3, que oferece um *payload* de 0-183 bytes, sem FEC, a taxa máxima de dados que pode ser obtida é de 390.4 Kbps. Se for considerado um canal assimétrico, pode-se atingir 585.6 Kbps num sentido e 86.4 Kbps no outro.

Nesta avaliação adota-se como referência para cálculo uma mensagem padrão de 80 bytes, que comporta adequadamente o “registro de medição de consumo” (Rm) e mais os campos de endereçamento e controle que serão inseridos pela camada de serviço de rede Bluetooth proposta (SRBT). Desse modo, é adequado supor que as mensagens sejam encaminhadas pelo protocolo Bandabase em pacotes tipo DH3, já que o tipo DH1 tem um *payload* insuficiente (máximo de 27 bytes). Entretanto, como neste caso não há um aproveitamento máximo do tamanho de pacote do Bandabase, se faz necessário um ajuste na taxa máxima de transmissão de dados, que seria então de 170.6 Kbps para canais simétricos, ou, para canais assimétricos, de 256 Kbps num sentido e 86.4 Kbps no reverso.

Considera-se que, para cada ciclo de coleta de consumo de energia, uma mensagem contendo um Rm será enviada de cada medidor, trafegando pela rede Bluetooth em direção ao concentrador, sem que haja uma mensagem de resposta ou de confirmação ao nível da aplicação (pacotes de confirmação serão enviados pelo protocolo Bandabase em cada enlace). Dado esse perfil de fluxo é adequado admitir-se que as mensagens sejam encaminhadas pelo protocolo Bandabase através de conexões ACL assimétricas, com pacotes DH3. Portanto, pode-se assumir como referência para esta avaliação uma taxa máxima de transmissão de dados de 256 Kbps para o concentrador e para os demais nós da rede.

Uma vez estabelecido um referencial para a taxa máxima de transmissão de dados do concentrador, é necessário avaliar o pico de volume de dados que pode ser gerado na rede em direção ao mesmo. Esse volume, que é representado pela taxa de chegada de dados obtida em

função da quantidade de medidores e da frequência de coleta de registros de consumo de energia, não poderá ter uma taxa de chegada superior a taxa máxima de transmissão de dados que está sendo considerada para o concentrador.

A tabela 4.1 a seguir apresenta a taxa de chegada de dados obtida pela combinação de algumas alternativas de quantidade de medidores por concentrador (coluna Mc) com opções de frequência de coleta (indicadas pela linha Fc) dentro de um intervalo de amostragem de 20 minutos. O valor na intersecção de uma coluna Fc com uma linha Mc representa a taxa de chegada de dados para aquele par de Mc e Fc (ver detalhes de cálculo no Apêndice A). Assim, por exemplo, a taxa de chegada de dados correspondente a uma área com 48 mil medidores ligados a um mesmo concentrador, cuja coleta de registros de medição de consumo de energia é feita a cada 2 minutos (Fc=10 vezes em 20 minutos), é o valor grifado de 256,0 Kbps.

Tabela 4.1: Taxa de chegada de dados ao concentrador

<b>Cálculo de volumes para a rede Bluetooth</b>												
Rm=Tamanho do registro de medição => <b>80 bytes</b>												
Mc=Medidores por concentrador												
Fc=Frequência de coleta de Rm												
Ic=intervalo de coleta (em minutos)												
		tempo de amostragem: 20 minutos										
		Ic	20	10	5	4	2,5	2				
		Fc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mc	taxa de chegada de dados em Kbps											
4.000	2,1	4,3	6,4	8,5	10,7	12,8	14,9	17,1	19,2	21,3		
8.000	4,3	8,5	12,8	17,1	21,3	25,6	29,9	34,1	38,4	42,7		
12.000	6,4	12,8	19,2	25,6	32,0	38,4	44,8	51,2	57,6	64,0		
16.000	8,5	17,1	25,6	34,1	42,7	51,2	59,7	68,3	76,8	85,3		
20.000	10,7	21,3	32,0	42,7	53,3	64,0	74,7	85,3	96,0	106,7		
24.000	12,8	25,6	38,4	51,2	64,0	76,8	89,6	102,4	115,2	128,0		
28.000	14,9	29,9	44,8	59,7	74,7	89,6	104,5	119,5	134,4	149,3		
32.000	17,1	34,1	51,2	68,3	85,3	102,4	119,5	136,5	153,6	170,7		
40.000	21,3	42,7	64,0	85,3	106,7	128,0	149,3	170,7	192,0	213,3		
48.000	25,6	51,2	76,8	102,4	128,0	153,6	179,2	204,8	230,4	<b>256,0</b>		
64.000	34,1	68,3	102,4	136,5	170,7	204,8	238,9	273,1	307,2	341,3		
66.000	35,2	70,4	105,6	140,8	176	211,2	246,4	281,60	316,80	352,0		

O gráfico apresentado na figura 4.8 mostra a mesma relação apresentada pela tabela 4.1, porém, ampliando o conjunto de frequências de coleta considerado para até uma coleta de

registro de consumo por minuto ( $F_c=20$  para uma janela de amostragem de 20 minutos). Desse modo, os volumes de dados resultantes de diversas combinações de  $M_c$  e  $F_c$  podem ser facilmente examinados (tanto no gráfico como na tabela) e verificados se estão acima ou abaixo da taxa máxima de transmissão de dados estabelecida como limite de capacidade do concentrador.

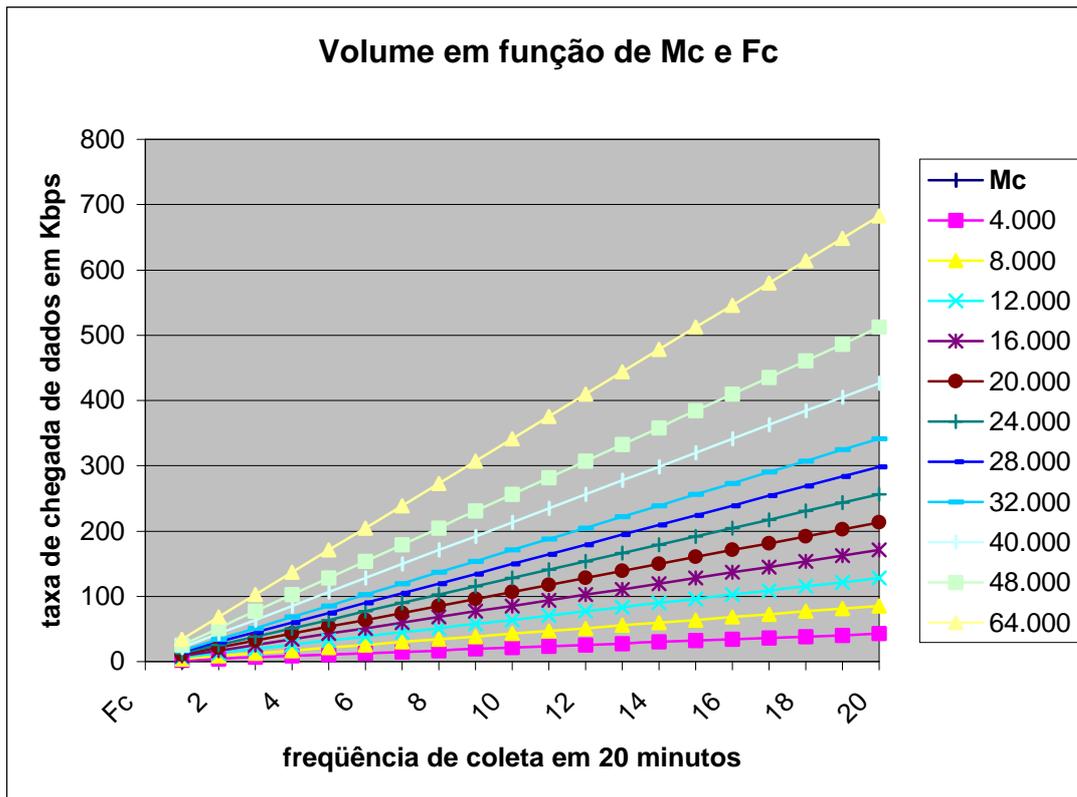


Figura 4.8: Gráfico de taxa de chegada de dados ao concentrador

Nesta primeira avaliação busca-se observar apenas a relação entre volume total de mensagens em cada ciclo de coleta e a capacidade máxima de transmissão de dados da *piconet* que tem o concentrador como *master*. Por essa razão admite-se uma simplificação no modelo de análise, supondo-se que todas as mensagens de um ciclo de coleta são geradas simultaneamente e enviadas diretamente para o concentrador (sem múltiplos saltos). Mesmo assim, a taxa de chegada de dados modelada dessa forma já é bastante útil, pois estabelece um parâmetro preliminar quanto ao volume total que o concentrador pode suportar. Assim fica claro que, qualquer combinação de  $M_c$  com  $F_c$  que resulte numa taxa de chegada de dados superior à taxa máxima de transmissão de dados estabelecida para o concentrador é

inaceitável e deve ser descartada porque provocaria uma saturação de capacidade da rede Bluetooth. Mas, por outro lado, o que estiver abaixo dessa taxa máxima de transmissão não pode ser tomado ainda como viável, pois uma avaliação mais detalhada é requerida, principalmente em função da existência, na maioria das vezes, de nós intermediários entre a origem da mensagem e o concentrador, que fazem com que a mensagem seja encaminhada através de múltiplas e sucessivas transmissões. Esses aspectos serão avaliados com base no exame do *tempo de retardo acumulado na rede* cujo modelo de análise será apresentado a seguir.

Neste próximo cenário de avaliação o modelo de análise considera que a área será coberta com uma rede Bluetooth composta de um concentrador com 4 segmentos em formato de estrela, conforme configuração mostrada na figura 4.9 a seguir. Cada segmento é constituído de um ramo primário, com 20 ou 40 nós por exemplo, e ramos secundários, à esquerda e à direita, de igual extensão. Um segmento típico é também ilustrado na figura 4.9.

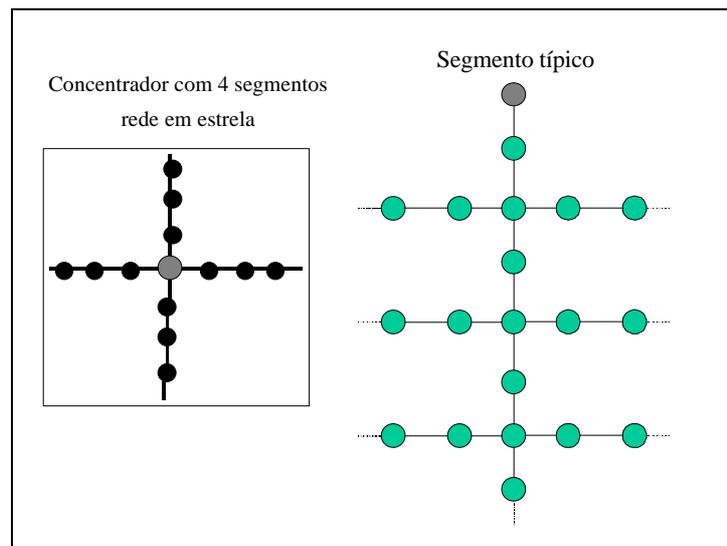


Figura 4.9: Configuração típica de uma área com um concentrador e 4 segmentos

Neste modelo pretende-se avaliar principalmente o efeito das sucessivas transmissões de uma mesma mensagem pela rede, em função dos nós intermediários que compõe o caminho de um nó de origem até o nó de destino (no caso, o concentrador), e também de questões características da tecnologia Bluetooth. Assim o modelo leva em conta não somente volumes e tempos de transmissão das mensagens, mas também uma estimativa de diversos fatores que podem implicar em maior retardo de rede, tais como o tempo de espera necessário

para obter a sincronização de *slaves* compartilhados entre duas piconets e o tempo que o dispositivo gasta executando outras tarefas, como por exemplo, fazendo *inquiry/scan*, e *parking/unparking* de dispositivos (ver capítulos 2 e 3).

Para tanto, as simulações são realizadas tendo como referência um segmento de rede típico, conforme mostrado na figura 4.9. Diferentes tamanhos de ramo primário e ramos secundários podem ser considerados, assim como variações na velocidade dos canais e dos parâmetros que representam tempos de espera em cada nó da rede. Inclui-se ainda o cálculo dos tempos de transmissão com base nas diferentes quantidades de medidores que cada tamanho de segmento representa. Mais detalhes quanto à planilha de cálculo e quanto aos parâmetros considerados podem ser vistos no Apêndice A.

Desse modo, considerando-se que, a cada ciclo de coleta de registros de consumo de energia, as mensagens enviadas pelos medidores interligados à estrutura de rede que corresponde ao segmento são encaminhadas para o nó adjacente em direção à raiz da estrutura, são computados os sucessivos tempos de transmissão das mensagens e estimados os tempos de espera em cada nó do ramo secundário ou primário pelo qual a mensagem tem que passar até atingir o concentrador. Dessa forma, é obtido finalmente o tempo de retardo acumulado no segmento. Isso equivale ao tempo total que o conjunto de mensagens de um ciclo de coleta de registros de consumo de energia dos medidores ligados ao segmento leva para alcançar o concentrador.

Posteriormente, com base nos resultados obtidos para um segmento típico, estima-se o tempo de retardo acumulado na rede correspondente a toda a área, considerando que ela é formada por quatro desses segmentos ligados a um mesmo concentrador, conforme a configuração já mostrada na figura 4.9.

Neste modelo supõe-se que todas as mensagens de coleta de registros de consumo são geradas simultaneamente no início de cada ciclo. Duas hipóteses com relação a forma de transmitir essas mensagens entre os nós de um ramo secundário ou ramo primário foram examinadas: transmissão parcialmente serializada e transmissão em paralelo.

Na primeira hipótese o modelo considera que as mensagens são transmitidas de forma serializada, do último nó de um ramo secundário para o seu nó raiz no ramo primário (raiz secundária), sendo que cada nó agrega ao seu próprio conjunto de mensagens o volume recebido do nó anterior, para então transmiti-lo ao nó seguinte, e assim sucessivamente, até chegar à raiz secundária. Em relação ao ramo primário o procedimento é semelhante, ou seja,

as mensagens recebidas dos ramos secundários, quando houver, serão agregadas às mensagens geradas no próprio nó primário e então enviadas para o nó subsequente em direção ao concentrador. Porém, aqui se considera que as mensagens provenientes dos ramos secundários chegam simultaneamente aos nós do ramo primário. Ou, dito de outra forma, admite-se que a progressão das transmissões de mensagens nos diferentes ramos secundários que compõe o segmento ocorre em paralelo, portanto, o tempo de retardo considerado sobre o ramo primário equivale ao tempo de um único par de ramos secundários e não a somatória de todos eles.

A segunda hipótese difere da primeira no sentido de que neste caso o modelo admite que as transmissões ocorrem em paralelo. Ou seja, tanto nos ramos secundários quanto no ramo primário as mensagens já disponíveis no próprio nó são encaminhadas à frente tão logo seja possível (o nó vizinho deve estar disponível), sem esperar pelo volume a ser agregado pelo nó anterior. Esse procedimento é repetido sucessivamente até que todas as mensagens de um ciclo tenham atingido o concentrador. O grau de paralelismo depende da quantidade de pares de nós que podem ser formados ao longo do segmento, portanto, quanto maior for o ramo primário ou o ramo secundário, maior a quantidade de transmissões paralelas que podem ser feitas. Essa dinâmica, evidentemente, produz resultados muito melhores que os obtidos pelo procedimento considerado na primeira hipótese. A figura 4.10 ilustra uma simulação desses dois processos, apresentando um gráfico que mostra a evolução do tempo de retardo acumulado estimado para um segmento típico, com ramo primário de até 20 nós e os ramos secundários sempre com 20 nós cada um. O taxa máxima de dados considerada para cada enlace (assimétrico) foi de 256 kps e supõe-se que cada nó atende em média 10 medidores.

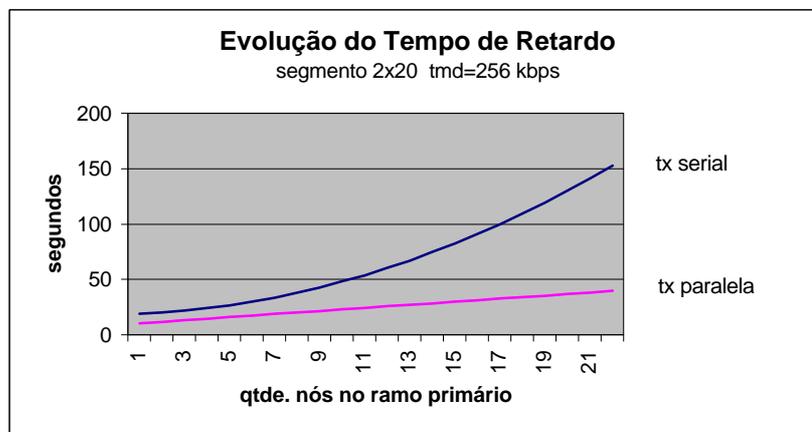


Figura 4.10: Evolução da estimativa de tempo de retardo acumulado no segmento

Observa-se que a medida em que aumenta a quantidade de nós no ramo primário, e por consequência a quantidade de medidores e o volume de mensagens, a estimativa do tempo de retardo acumulado no segmento cresce de forma linear para a hipótese de transmissão paralela e de forma não-linear no caso de transmissão parcialmente serializada. Por essa razão, adotou-se como hipótese de trabalho predominante o procedimento que considera que as transmissões serão feitas em paralelo tanto quanto possível (ou seja, de acordo com a quantidade de pares simultâneos que podem ser formados ao longo do segmento).

A seguir são apresentados alguns dos resultados obtidos com as simulações realizadas de acordo com esse modelo de análise baseado no tempo de retardo acumulado na rede. O gráfico apresentado na figura 4.11 mostra a relação entre a quantidade de medidores interligados a um segmento e a estimativa do tempo de retardo acumulado nesse mesmo segmento para enviar todas as mensagens de um ciclo de coleta de registros de consumo. Trata-se neste caso de um segmento típico com ramos secundários de 40 nós cada um e ramo primário de até 40 nós de extensão, supondo-se uma média de 10 medidores por nó. A taxa máxima de dados considerada foi de 256 Kbps e o regime de operação supõe que as transmissões ocorrem em paralelo.

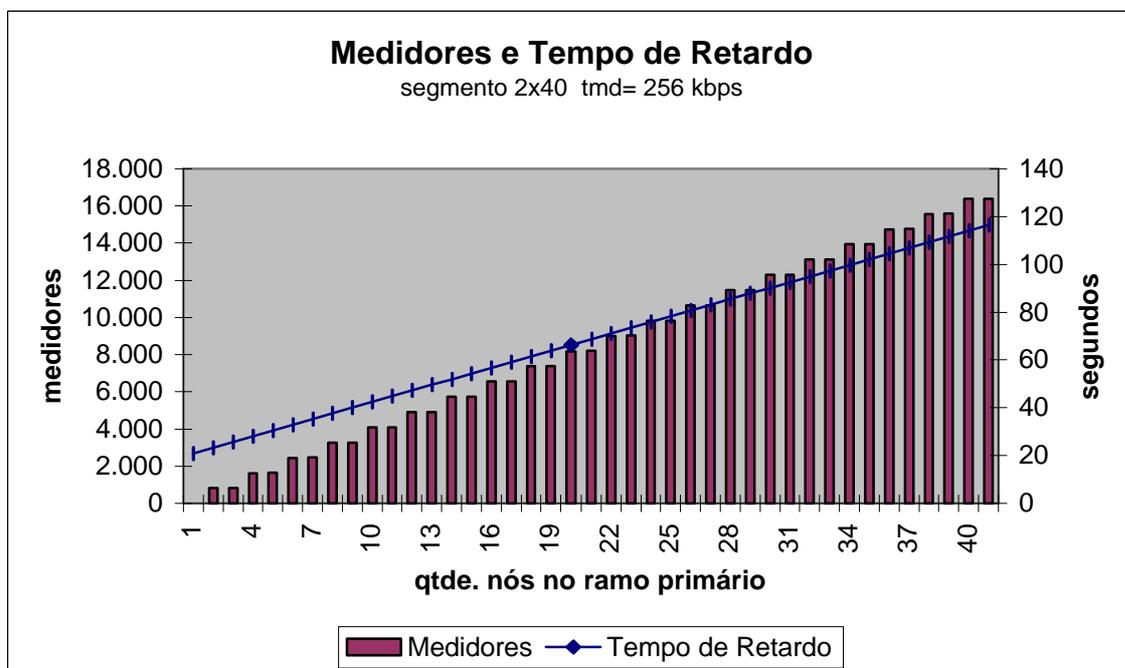


Figura 4.11: Volume de medidores e estimativa de tempo de retardo acumulado

O gráfico mostra como cresce o tempo de retardo estimado para a rede à medida que se coloca mais medidor no mesmo segmento (estendendo-se o tamanho do nó primário, neste caso). Assim, por exemplo, se o ramo primário tiver 20 nós e 8.200 medidores o tempo de retardo acumulado na rede é estimado em 68 segundos. Se este ramo primário for estendido para 40 nós, de forma a atender 16.400 medidores, o tempo de retardo estimado passa para cerca de 117 segundos.

A tabela 4.2 apresenta um resumo dos resultados de simulação obtidos para um segmento típico com diferentes opções de tamanhos para ramos secundários e ramo primário. Em cada alternativa a tabela destaca os valores em segundos e em minutos para a estimativa de tempo de retardo acumulado no segmento, considerando 10 medidores por nó e regime de transmissão em paralelo com taxa máxima de transmissão de dados de 256 Kbps. Pode-se observar, por exemplo, que um segmento típico com ramo primário de 40 nós e ramos secundários de igual tamanho, abrangendo 16.400 medidores, apresenta uma estimativa de tempo de retardo acumulado de 116,4 segundos (1,9 minuto). Só para reforçar a hipótese adotada quanto ao regime de transmissão, a tabela inclui também os valores correspondentes ao regime de transmissão parcialmente serializada (coluna TrtAcum Serial), que, conforme pode ser verificado, pode até ser aceitável para pequenas redes, mas mostra-se impraticável para redes de maior porte.

Tabela 4.2: Estimativa de tempo de retardo acumulado para um segmento típico

<b>Resultados da simulação para um segmento típico</b>					
com tx em paralelo e tmd=256 Kbps					
<b>Segmento</b>		TrtAcum Serial	<b>Total de Medidores</b>	<b>Tempo de Retardo Acumulado no Segmento</b>	
Tipo R.Sec.	Tam. R. S x P			s	s
2	20x20	141	<b>4.200</b>	<b>38,2</b>	<b>0,6</b>
2	20x40	473	<b>8.400</b>	<b>65,9</b>	<b>1,1</b>
2	20x80	1.767	<b>16.800</b>	<b>121,4</b>	<b>2,0</b>
					<b>0,0</b>
2	40x20	290	<b>8.200</b>	<b>68,7</b>	<b>1,1</b>
2	40x40	932	<b>16.400</b>	<b>116,4</b>	<b>1,9</b>
2	40x80	3.446	<b>32.800</b>	<b>211,9</b>	<b>3,5</b>
					<b>0,0</b>
2	80x80	6.864	<b>64.800</b>	<b>392,9</b>	<b>6,5</b>
2	80x40	1.910	<b>32.400</b>	<b>217,42</b>	<b>3,6</b>

Com base na estimativa do tempo de retardo acumulado para um segmento típico é possível estimar também o retardo para toda a área atendida pelo concentrador, de acordo com a configuração estabelecida (neste caso 4 segmentos em estrela). Em princípio todos os segmentos de um concentrador trabalham em paralelo, ou seja, as transmissões entre duplas de nós em diferentes segmentos podem ocorrer simultaneamente. Entretanto, o grau de paralelismo não é total, pois os nós adjacentes ao concentrador, apesar de pertencerem a diferentes segmentos, também fazem parte de uma mesma *piconet*, cujo *master* é o próprio concentrador, o que significa que as transmissões desses nós com concentrador não podem ocorrer de forma simultânea. Portanto, é preciso considerar que existe ali uma certa contenção, que é agravada pelo perfil do fluxo de dados em avaliação, já que todas as mensagens de um ciclo de coleta de registros de consumo de energia são encaminhadas para o concentrador.

Um resumo dos resultados estimados para um concentrador, a partir dos resultados de simulação já obtidos para um segmento típico, considerando três diferentes portes de rede é apresentado na tabela 4.3. A primeira configuração considera um concentrador com 4 segmentos, com ramos secundários de 20 nós e ramos primários também de 20 nós, que é suficiente para a cobertura de uma área de aproximadamente 4 Km<sup>2</sup> e cerca de 16.800 medidores. Neste caso, os resultados obtidos na simulação indicam que o tempo de retardo acumulado na rede é de aproximadamente 96 segundos. As demais configurações basicamente ampliam a área de atendimento e a quantidade de medidores interligados no mesmo concentrador.

Tabela 4.3: Estimativa de tempo de retardo acumulado para uma área típica

<b>Estimativa para um concentrador com 4 segmentos típicos</b>						
com tx em paralelo e tmd=256 Kbps						
<b>Segmento</b>		TrtAcum Serial	<b>Total de Medidores</b>	<b>Tempo de Retardo Acumulado na Rede</b>		<b>Área aprox.</b>
Tipo	Tam. R.			s	s	
R.Sec.	S x P	s				
2	20x20	141	<b>16.800</b>	<b>95,43</b>	1,59	4 Km <sup>2</sup>
2	40x40	932	<b>65.600</b>	<b>291,05</b>	4,85	16 Km <sup>2</sup>
2	80x80	6.864	<b>259.200</b>	<b>982,30</b>	16,37	64 Km <sup>2</sup>

Esses resultados de simulação indicam, por exemplo, que numa área de cerca de 16 Km<sup>2</sup>, configurada tal como a segunda alternativa da tabela 4.3, a coleta de registros de consumo de energia poderá ser feita com uma frequência de até 5 minutos, sem que haja sobrecarga na rede Bluetooth. Já para uma área menor, com menos medidores, como ilustrado na primeira alternativa da tabela 4.3, a frequência de coleta poderia aumentar, podendo ocorrer em intervalos menores que 2 minutos, praticamente a cada minuto e meio.

Confrontando-se esses dados de estimativa do *tempo de retardo acumulado na rede* com os de *taxa de chegada de dados* ao concentrador, pode-se verificar, por exemplo, que a taxa de chegada de dados para 65.600 medidores indica a priori a possibilidade de se fazer a coleta de registros de consumo de energia com uma frequência de até 3 minutos. Por outro lado, para esse mesmo caso, a estimativa do tempo de retardo acumulado na rede indica que o intervalo de tempo mínimo para essa coleta deve ser da ordem de 5 minutos. Ou seja, o parâmetro *taxa de chegada de dados* serve para dar uma idéia aproximada de volumes versus capacidade de rede, mas como o seu modelo simplifica muito a realidade esse valor não pode ser tomado como definitivo. Para uma avaliação mais segura e completa é necessário considerar o *tempo de retardo acumulado na rede*, pois a estimativa deste último está baseada num modelo que representa com mais propriedade as condições relevantes da rede Bluetooth e da demanda de comunicação gerada pelo sistema de telemetria, cujo perfil de volume pico é caracterizado pela função de coleta continuada de registro de consumo de energia.

Com base nos resultados obtidos com este modelo pode-se observar que a rede Bluetooth proposta possui capacidade e flexibilidade para atender uma grande quantidade de medidores por concentrador. Assim, observa-se pelos resultados, por exemplo, que áreas variando de 4 a 16 Km<sup>2</sup>, correspondendo a cerca de 16 mil até 65 mil medidores, podem ser atendidas por um único concentrador e ainda assim manter desempenho de rede suficiente para oferecer, ao serviço de coleta continuada de registro de consumo, frequências que podem variar respectivamente de 2 minutos a 5 minutos, o que está bem acima dos requisitos mínimos estabelecidos pelo sistema de telemetria tomado como referência.

Dessa forma, fica evidenciado que a rede Bluetooth proposta, baseada no uso de grandes *scatternets*, tem capacidade e flexibilidade adequadas para atender as demandas de comunicação do sistema de telemetria de distribuição de energia elétrica.

## 4.5. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais aspectos relativos ao desenvolvimento desse trabalho. As demandas de comunicação geradas pelo sistema de telemetria de serviços de distribuição de energia elétrica, adotado como referência para o estudo, foram caracterizadas. E a partir destas, foi desenvolvida e apresentada uma proposta de arquitetura de rede, que inclui o uso de *scatternets* Bluetooth para solucionar o atendimento da “última milha”, oferecendo uma alternativa de solução que contempla comunicação *wireless* com baixo custo médio por ponto atendido, além de baixo consumo de energia e tamanho pequeno.

Além disso, foi apresentada uma proposta com relação aos aspectos mais críticos que envolvem o uso de *scatternets* em ampla área geográfica, que são as questões relativas à topologia, roteamento e estrutura de formação das *scatternets*. Essa proposta, tratando de modo conjunto estes três aspectos, estabelece uma topologia e uma estrutura de *scatternet* apropriadas ao caso e com base nelas define um eficiente algoritmo de roteamento de mensagens, de modo que as demandas identificadas no cenário de aplicação adotado como referência possam ser atendidas. A proposta considera ainda que a função de roteamento de mensagens na rede Bluetooth será implementada como uma camada de serviço de uso comum. Para tanto, é definido um conjunto básico de primitivas para um serviço não-orientado à conexão, que estabelece uma interface padrão para acesso ao serviço, facilitando desse modo o uso da rede pelas aplicações. Adicionalmente, essa estruturação em camada facilitará também a própria extensão futura dos serviços oferecidos.

Inclui-se também uma avaliação quanto à capacidade de tráfego da rede Bluetooth diante dos volumes de dados a serem transportados. Os resultados dessa avaliação indicam que a estrutura de rede proposta tem condições de suportar com folga as demandas de comunicação de dados do sistema de telemetria adotado como referência.

Os principais desafios propostos nesse trabalho dizem respeito à aplicabilidade da tecnologia Bluetooth como rede de comunicação *wireless* de suporte a um sistema de telemetria de distribuição de energia elétrica, incluindo principalmente a busca de respostas para algumas questões críticas, tais como:

- Qual topologia de rede deveria ser adotada?
- Como formar e estruturar *scatternets* de capacidade adequada?
- Como fazer o roteamento de mensagens nas *scatternets*?

Considerando-se a arquitetura de rede proposta, a topologia e estrutura adotada para as *scatternets*, os algoritmos de roteamento já delineados e estruturados em uma camada de Serviço de Rede Bluetooth (SRBT), conforme apresentados neste capítulo, ficam superados os principais desafios inicialmente identificados nesse trabalho.

Dessa forma, demonstrada-se a viabilidade técnica de uso da tecnologia Bluetooth em áreas de grande abrangência geográfica, como é o caso representado pelo sistema de telemetria de serviços de distribuição de energia elétrica.

E desse modo, abre-se o caminho para que outros cenários de aplicação com características similares possam também ser atendidos com o mesmo tipo de solução delineada nesse trabalho. Alguns exemplos que a priori têm potencial para tanto são as aplicações de monitoração de sensores de segurança, de sismógrafos, de medidores de gás, de monitores ambientais, entre outros.

As principais características que devem ser levadas em conta na avaliação de aplicabilidade desta solução em outros cenários de uso de Bluetooth são as seguintes:

- Quantidade e densidade de dispositivos
  - Poderá envolver centenas ou até milhares de dispositivos com a tecnologia Bluetooth incorporada, desde que distribuídos geograficamente com uma densidade apropriada, que permita, por um lado, garantir condições de conectividade da estrutura, e, por outro lado, que não haja um número excessivo de *piconets* sobrepostas num mesmo espaço físico, de modo a evitar níveis inaceitáveis de interferência.
- Tamanho da área geográfica
  - Poderá variar de algumas centenas de metros quadrados até vários quilômetros quadrados, porém, desde que mantida uma densidade adequada para garantir conectividade e cobertura da rede.
- Perfil de tráfego de dados
  - Aplicações que possam operar com baixa taxa de dados e com latência de rede elevada. Os valores objetivos estarão estreitamente ligados com o volume de tráfego e o diâmetro da rede (quantidade máxima de saltos entre nós).

- Configuração da rede Bluetooth
  - Mobilidade baixa ou inexistente, ou seja, a maioria dos dispositivos Bluetooth é formada por pontos fixos.
  - Estabilidade de configuração: a quantidade de inclusão e exclusão de dispositivos após a implantação inicial da rede em uma área deve ser relativamente baixa, considerando-se que a re-configuração da rede é não é uma operação dinâmica.

Cenários de aplicação com maior aderência às essas características oferecem maior potencial para utilização dos elementos de solução apresentados neste trabalho.

# Conclusão

Neste trabalho, observou-se no capítulo 1 que as demandas atuais das companhias de distribuição de energia propiciam uma oportunidade singular para aplicação da tecnologia Bluetooth na cobertura de áreas geográficas mais amplas, de modo a suportar as necessidades de comunicação de sistemas de telemetria. Esse fato abre espaço para um novo cenário de uso dessa tecnologia, distinto de sua vocação original, que é a “rede pessoal sem fio” (*WPAN*, *Wireless Personal Area Network*) e também distinto do cenário de redes ad hoc móveis, que é outra área de importância crescente onde a tecnologia Bluetooth tende a ser aplicada com maior intensidade. Esse novo cenário é representado, para efeitos desse estudo, pelas demandas de comunicação de dados geradas por um sistema de telemetria de serviços de distribuição de energia elétrica.

Uma descrição da tecnologia Bluetooth, oferecendo uma visão geral de sua arquitetura, seus principais recursos, seus mais importantes cenários de aplicação, bem como seu posicionamento em relação a outras tecnologias *wireless* disponíveis no mercado, foi também apresentada no capítulo 2. Um destaque especial foi dado ao tema *scatternet*, no capítulo 3, devido ser este um recurso chave no contexto das alternativas de solução que o presente estudo buscou desenvolver.

Ao longo desse trabalho procurou-se principalmente demonstrar o interesse e a viabilidade de aplicação da tecnologia Bluetooth na formação de uma rede de comunicação de dados *wireless* capaz de interligar dispositivos eletrônicos dispersos geograficamente, como seria o caso dos medidores de energia elétrica, que foi tomado como cenário de referência para o estudo.

A arquitetura de rede proposta no capítulo 4 para atender tal cenário tem por base a interconexão de grandes *scatternets*, formadas pela interligação dos dispositivos de uma certa área geográfica que incorporam a tecnologia Bluetooth, com uma rede padrão Internet. Encontrou-se no uso de *scatternets* Bluetooth uma alternativa de rede *wireless* de baixo custo e alta capilaridade, bastante apropriada para responder aos desafios típicos da comunicação na “última milha”.

Com base nesse desenho de rede, apresentou-se ainda no capítulo 4 uma proposta de solução para as demandas desse cenário de aplicação com relação às questões de estrutura, topologia e roteamento em grandes *scatternets*, incluindo-se uma avaliação quanto à capacidade de tráfego da rede Bluetooth proposta. A solução delineada indica que os principais desafios para se usar a tecnologia Bluetooth como base para redes *wireless* de maior abrangência geográfica têm resposta positiva no contexto estudado. Além disso, a solução mostra-se promissora como alternativa para outros cenários similares.

Trabalhos futuros nesta área incluem principalmente:

- Implementar um protótipo do sistema de telemetria de distribuição de energia elétrica conforme proposto. O projeto originado deste trabalho e já aprovado pela FINEP, envolvendo a Siemens, CEFET-PR e PUCPR, se levado a diante, seria uma boa oportunidade para isso.
- Estender as funcionalidades da camada de Serviço de Rede Bluetooth (SRBT). Uma possibilidade seria a introdução de uma primitiva para envio de mensagens com confirmação de entrega (“registradas”), em que o serviço confirma que uma mensagem foi entregue ao destinatário, ou, se incapaz de fazê-lo depois de decorrido certo prazo, avisa a aplicação remetente. Outra possibilidade, seria avaliar o interesse e a viabilidade de se introduzir primitivas para um serviço orientado à conexão. Isso poderia incluir uma avaliação quanto à possibilidade de integração dessa camada com o protocolo L2CAP (Logical Link and Control Adaptation Protocol) que oferece também uma interface orientada à conexão, porém restrita a uma única *piconet*.
- Implementar um protótipo do Serviço de Rede Bluetooth (SRBT) e avaliar o algoritmo de roteamento em conjunto com as diversas propostas de algoritmo de gerenciamento de tráfego *inter-piconet* e *intra-piconet* apresentadas na literatura, visando identificar a combinação que propicia melhor desempenho de rede.
- Estender a estrutura de rede *scatternet* proposta para dar suporte a mecanismos de tolerância à falhas. Uma possível abordagem para essa questão seria a introdução de rotas alternativas na rede e alguma forma de redirecionar o fluxo de dados para uma nova rota quando a principal apresentar problema. Entretanto, qualquer que seja a abordagem nessa área, não se pode perder de

vista que a rede em questão envolve grande número de dispositivos que devem ser, por definição, simples, pequenos, de baixo consumo de energia e de baixo custo. As soluções para tolerância à falhas não devem alterar esse perfil característico da rede, sob pena de se tornarem inaplicáveis.

- Avaliar a possibilidade de aplicação dos resultados desse estudo em outras áreas potenciais envolvendo dispositivos eletrônicos dispersos, como por exemplo, sensores de segurança, sismógrafos, monitoração ambiental, medidores de gás, entre outros.

A tecnologia Bluetooth é bastante recente e apresenta um potencial de utilização bastante amplo e variado, conforme pode ser observado pela quantidade de perfis já especificados e aprovados pelo Bluetooth SIG e dos perfis ainda em avaliação. O cenário de aplicação apresentado neste trabalho não faz parte dos perfis previstos pelo Bluetooth SIG mas mostra-se bastante promissor. E, por se tratar de um cenário novo para aplicação de uma tecnologia que está em fase de maturação, existe ainda muito espaço para pesquisa e desenvolvimento.



# Referências Bibliográficas

- [ABR03] ABRACE – Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia. Relatório ABRADDEE-08.05, <http://www.abrace.org.br/Eletobras/t2.7.htm>
- [ALV01] ALVARENGA, L.; VAZ, A. P.; SOUZA, F. C.; BANDIM, C. J. “Considerações sobre o Uso de Redes de Distribuição de Energia Elétrica como Meio de Propagação de Sinais de Comunicação”. Campinas. XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2001.
- [ANE02] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, <http://www.aneel.gov.br>
- [AUS00] AU-SYSTEM. “*Bluetooth Whitepaper 1.1*”. Au-System, pp. 25, January 2000.
- [BAA01] BAATZ, SIMON; FRANK, M.; KÜHL, C.; MARTINI, P., SCHOLZ, C. “*Adaptive Scatternet Support for Bluetooth using Sniff Mode*”. Tampa, Proc. 26<sup>th</sup> Annual Conference on Local Computer Networks, LCN 2001, Nov. 2001.
- [BAA02] BAATZ, SIMON et al. “*Bluetooth Scatternets: An Enhanced Adaptive Scheduling Scheme*”. New York, Proc. 21<sup>st</sup> Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2002, Jun 2002.
- [BHA01] BHAGWAT, PRAVIN, “*Bluetooth: Technology for Short-Range Wireless Apps*”, IEEE Internet Computing, p. 96 – 103, May-June 2001.
- [BHA99] BHAGWAT, PRAVIN; SEGALL, A. “*A Routing Vector Method (RVM) for Routing in Bluetooth Scatternets*”, Proc. IEEE Workshop MoMuC’99, pp. 375-379, Nov 1999”.

- [BIS01] BISDIKIAN, CHATSCHIK, “*An Overview of the Bluetooth Wireless Technology*”, IEEE Communications Magazine, p. 86-93, December 2001.
- [BLU01a] BLUETOOTH SIG, *Specification of Bluetooth System – Core*, Specification Volume 1, Version 1.1, pp.1084, February 22, 2001. <http://www.bluetooth.com>
- [BLU01b] BLUETOOTH SIG, *Specification of Bluetooth System – Profile*, Specification Volume 2, Version 1.1, pp.452, February 22, 2001. <http://www.bluetooth.com>
- [BRC02] BLUETOOTH RESOURCE CENTER.  
<http://www.palowireless.com/infotooth/tutorial/hci.asp#HCI>
- [DOR01] DORNAN, ANDY. *Wireless Communication: O Guia Essencial de Comunicação Sem Fio*. [Tradução de Fábio Freitas], Rio de Janeiro, Editora Campus, pp. 304, título original: *The Essential Guide to Wireless Communications Applications*, Prentice Hall, 2001.
- [GAZ02] GAZETA MERCANTIL. “Ligações clandestinas e fraudes em medidores aumentam no Nordeste”, 31/07/2002; e balanços das companhias de energia, publicados em diversas datas.
- [HAR02] HAR-SHAI, LIRON; KOFMAN, R.; ZUSSMAN, G.; SEGALL, A. “*Inter-Piconet Scheduling in Bluetooth Scatternets*”. Proc. OPNETWORK 2002 Conference, Aug. 2002.
- [HEL01] HELD, GILBERT. *Data Over Wireless Networks – Bluetooth, WAP, & Wireless LANs*. McGraw-Hill, pp. 344, 2001.
- [JOH01a] JOHANSSON, P.; KAZANTZIDIS, M.; GERLA M. “*Bluetooth: An Enabler for Personal Area Networking*”. IEEE Network, Sep/Oct 2001, Vol. 15, No.5, pp. 28-37.
- [JOH01b] JOHANSSON, PER; SÖRENSEN, JOHAN. “*Ad Hoc IP Networks over Bluetooth*”. ISOC 2001.
- [JOH02] JOHANSSON, P.; KAZANTZIDIS, M.; GERLA M. “*Rendezvous Scheduling in Bluetooth Scatternets*”. Proc. IEEE ICC’02, Apr. 2002.

- [JON01] JÖNSSON, ULF; ALRIKSSON, F.; JOHANSSON, N. “*JUMP Mode – A Dynamic Window-based Scheduling Framework for Bluetooth Scatternets*”. Long Beach, Proc. MobiHOC 2001, ACM International Symposium on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing, p. 204-211.
- [KAL00] KALIA, MANISH; GARG S.; SHOREY, R. “*Scatternet Structure and Inter-Piconet Communciation in the Bluetooth System*”, New Delhi, IEEE National Conference on Communications 2000.
- [LAW01] LAW, CHING; SIU, KAI-YEUNG. “*A Bluetooth Scatternet Formation Algorithm*”. San Antonio, Texas, Proc. IEEE Symposium on Ad Hoc Wireless Networks 2001, Nov. 2001.
- [LEE01] LEEPER, DAVID G., “*A long-Term View of Short-Range Wireless*”, IEEE Computer, p. 39-44, June 2001.
- [LIN03] LIN, TING-YU.; TSENG, Y.; CHANG, K.; TU, C. “*Formation, Routing, and Maintenance Protocols for the BlueRing Scatternet of Bluetooths*”. Hawaii, International Conference on Systems Sciences (HICSS), 2003.
- [MIB01] MILLER, BRENT A.; BISDIKIAN, C. *Bluetooth Revealed – The Insider’s Guide to an Open Specification for Global Communications*. Prentice-Hall, Inc., 2001, pp. 303.
- [MIK00] MIKLÓS, GYORGY et. al., “*Performance Aspects of Bluetooth Scatternet Formation*”, First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing, 2000, MobiHOC 2000, p. 147 –148.
- [MIL01] MILLER, MICHAEL. *Descobrimdo Bluetooth*. [Tradução de Altair Dias et. al.], Rio de Janeiro, Editora Campus, pp. 289; Título original: *Discovering Bluetooth*, Sybex Inc, 2001.
- [PAL03a] PALOWIRELESS. “*Bluetooth Additional Profiles – Overview*”. Jan. 2003. <http://www.palowireless.com/bluearticles>
- [PAL03b] PALOWIRELESS. “*Future Versions of Bluetooth – Bluetooth 1.2 & Bluetooth 2.0*”. Jan. 2003. <http://www.palowireless.com/bluearticles>

- [RAC01] RÁCZ, ANDRÁS; MIKLÓS, G.; KUBINSZKY, F.; VALKÓ, A. “*A Pseudo Random Coordinated Scheduling Algorithm for Bluetooth Scatternets*”. Proc. MobiHOC 2001, ACM International Symposium on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing, p. 193-203.
- [ROS01] ROSE, BILL. “*Home Networks: A Standards Perspective*”. IEEE Communications Magazine, Dec. 2001, p. 78-85.
- [SAL01] SALONIDIS, THEODOROS; BHAGWAT P.; TASSIULAS, L; LaMAIRE, R. “*Distributed Topology Construction of Bluetooth Personal Areas*”, IEEE, INFOCOM 2001, <http://www.ieee-infocom.org/2001/paper/785.pdf>
- [SUN02] SUN, MIN-TE; CHANG, C.; LAI, T. “*A Self-Routing Topology for Bluetooth Scatternets*”. Manila, Proc. I-SPAN 2002, May 2002.
- [SUV00] SUVAK, DAVE. “*IrDA and Bluetooth: A Complimentary Comparison*”, Copyright Extended Systems, Inc., 2000.
- [TAN01] TAN, GODFREY; MIU, A.; GUTTAG, J.; BALKRISHNAN, H. “*Forming Scatternets from Bluetooth Personal Networks*”. MIT Technical Report, MIT-LCS-TR-826, Oct. 2001.
- [ZHA02] ZHANG, W.; CAO, G. “*A Flexible Scatternet-wide Scheduling Algorithm for Bluetooth Networks*”. IEEE IPCCC 2002.

# Apêndice A

## Planilhas do Modelo de Simulação

Na seção 4.4 foi apresentada uma avaliação quanto à capacidade de transmissão de dados da rede Bluetooth, proposta neste trabalho, diante do volume de dados que o sistema de telemetria de serviços de distribuição de energia elétrica pode gerar. Essa avaliação tinha como principal objetivo estabelecer parâmetros que pudessem indicar qual a quantidade de medidores que pode ser suportada por um concentrador, de modo a se estabelecer um referencial para a delimitação das áreas de cobertura correspondentes cada região em que o sistema de telemetria venha a ser usado. A avaliação foi feita com base em dois parâmetros, a taxa de chegada de dados ao concentrador e o tempo de retardo acumulado na rede.

Neste apêndice serão apresentadas informações mais detalhadas a respeito do modelo de análise adotado como base da avaliação, particularmente com relação aos cálculos efetuados e os parâmetros utilizados nas planilhas de apoio.

### A.1. Cálculo da Taxa de Chegada de Dados

A taxa de chegada de dados ao concentrador representa, em Kbps, o volume de dados gerados pelas mensagens enviadas através da rede Bluetooth em cada ciclo de coleta de registros de consumo de energia.

Seja  $T_c$  = taxa de chegada de dados,

então:

$$T_c = \left[ \frac{M_c \times R_m \times 8 \times F_c}{t_a} \right] \times \frac{1}{1000}$$

onde:

$M_c$  = quantidade de medidores por concentrador

$R_m$  = tamanho do registro de medição (em bytes)

$F_c$  = frequência de coleta dentro do período de amostragem

$t_a$  = tempo de amostragem

Os valores apresentados na tabela 4.1 da seção 4.4, representando a taxa de chegada de dados para cada par de  $M_c$  e  $F_c$ , foram obtidos considerando-se que:

$R_m = 80$  bytes

$t_a = 1200$  segundos (20 minutos)

O gráfico apresentado na figura 4.8 da seção 4.4 é baseado nos valores da tabela 4.1 na mesma seção.

## A.2. Estimativa de Tempo de Retardo Acumulado na Rede

Com base no tempo de retardo acumulado na rede pretende-se avaliar principalmente o efeito das sucessivas transmissões de uma mesma mensagem pela rede, em função dos nós intermediários que compõe o caminho de um nó de origem até o nó de destino (no caso, o concentrador), e também de questões características da tecnologia Bluetooth. Assim o modelo leva em conta não somente volumes e tempos de transmissão das mensagens, mas também uma estimativa de diversos fatores que podem implicar em maior retardo de rede, tais como o tempo de espera necessário para obter a sincronização de *slaves* compartilhados entre duas piconets e o tempo que o dispositivo gasta executando outras tarefas, como por exemplo, fazendo *inquiry/scan*, e *parking/unparking* de dispositivos.

Para se obter uma estimativa do tempo de retardo acumulado na rede foi usado como modelo uma área com um concentrador e 4 segmentos típicos em formato de estrela, conforme definido na seção 4.4. Primeiro é feito uma simulação para um segmento típico e em seguida os resultados obtidos são usados para se estimar o tempo de retardo para toda a área. Para tanto, foi utilizada uma planilha de apoio. Os cálculos foram validados através de verificação analítica.

Os parâmetros básicos de entrada dessa planilha são os seguintes:

**M**=média de medidores atendidos por nó da rede

**tmd**= taxa máxima de dados em kbits/s

**Rm**=registro de medição de consumo (tamanho em bytes)

**VI**= volume de dados local de um nó (em bits)

**tg**= tempo de gerenciamento de tarefas diversas (em *slots*) – tx serial

**tg**p= tempo de gerenciamento de tarefas diversas - tx paralela

**Ps**=probabilidade de sucesso na sincronização de *slave*

**Tw**=tempo de janela de sincronização de *slave* em cada *piconet* – tx serial

**twp**=tempo de janela de sincronização de *slave* em cada *piconet* – tx paralela

**qNRS**=quantidade de nós no ramo secundário

**QRs**=quantidade de ramos secundários por nó *master*

A tabela A.1 (partes a e b) mostra um exemplo de simulação de tempo de retardo acumulado para um segmento típico, conforme definido na seção 4.4. A tabela A.1a mostra a parte relativa a um ramo secundário, destacando os resultados para o caso de um ramo com 20 nós de comprimento. A tabela A.1.b mostra a parte relativa ao ramo primário, destacando os resultados para o caso de um segmento com ramo primário de 20 de nós de comprimento, com ramos secundários também de 20 nós.

Os valores utilizados como parâmetros de entrada neste caso foram os seguintes:

**M**=10 medidores em média

**tmd**= 256 Kbps

**Rm**=80 bytes

**VI**= 6400 bits

**qNRS**=20

**QRs**=2

**Ps**=50%

<b>ramo secundário</b>	<b>ramo primário</b>
<b>tg</b> = 320 <i>slots</i>	<b>tg</b> = 520 <i>slots</i>
<b>tg</b> p=320 <i>slots</i>	<b>tg</b> p=520 <i>slots</i>
<b>Tw</b> =80 <i>slots</i>	<b>Tw</b> =80 <i>slots</i>
<b>twp</b> =80 <i>slots</i>	<b>twp</b> =80 <i>slots</i>

A seguir serão descritos os passos intermediários de cálculos efetuados através da planilha mostrada na tabela A.1 (parte a e parte b) até se chegar ao valor estimado para o tempo de retardo acumulado no ramo secundário. A descrição das fórmulas de cálculo usadas nas diversas colunas fazem referência aos parâmetros de entrada acima descritos.

Tabela A.1.a – Simulação de tempo de retardo acumulado num ramo secundário

## Simulação de Tempo de Retardo na Rede Bluetooth

## ramo secundário

10		M=média de medidores por nó													
256	Kbps	tmd= taxa máxima de dados em kbits/s													
80	bytes	Rm=registro de medição													
6400	bits	VI= volume local de um nó													
320	slots	tg= tempo de gerenciamento de tarefas diversas	0,2 segundos						tgp=	320	slots	0,2	segundos		
0,5		Ps=probabilidade de sucesso na sincronização de slave													
		Te= tempo médio de espera para obter sincronização de slave													
		Vg= volume global do nó ( Vg do nó anterior + VI do nó corrente) em bits													
		Vg inicial = 0													
80	slots	Tw=tempo de janela de sincronização de slave em cada piconet	0,05 segundos						twp=	80	slots	0,05	segundos		
		Trs= tempo de retardo em nó secundário													
		TrsAcum= tempo de retardo acumulado no ramo secundário													
		QmedAcum=quantidade de medidores no ramo secundário													
									tepAcum=						
									tempo de espera acumulado para tx em paralelo						
									FP=						
									fator de calculo de volume para tx em paralelo						
									xxAP=						
									variável ajustada para tx em paralelo						

	Ramo secundário - tx serializada						tx em paralelo								
	Vg	Ttx	Te	Trs	TrsAcum	VgAcum	TtxAcum	TepAcum	FP	VgAcumAP	TtxAP	TtxAP	TrsAcumAP	QmedAcum	
0	0	s	s	s	0	0	0	0		bits		TtxAcum		0	
1	6400	0,025	0,2125	0,2375	0,2375	6.400	0,025	0,2125	10	6.400	0,025	100,00%	0,2375	10	
2	12800	0,05	0,2125	0,2625	0,5	19.200	0,075	0,425	30	19.200	0,075	100,00%	0,5000	20	
3	19200	0,075	0,2125	0,2875	0,7875	38.400	0,15	0,6375	50	32.000	0,125	83,33%	0,7625	30	
4	25600	0,1	0,2125	0,3125	1,1	64.000	0,25	0,85	70	44.800	0,175	70,00%	1,0250	40	
5	32000	0,125	0,2125	0,3375	1,4375	96.000	0,375	1,0625	90	57.600	0,225	60,00%	1,2875	50	
6	38400	0,15	0,2125	0,3625	1,8	134.400	0,525	1,275	110	70.400	0,275	52,38%	1,5500	60	
7	44800	0,175	0,2125	0,3875	2,1875	179.200	0,7	1,4875	130	83.200	0,325	46,43%	1,8125	70	
8	51200	0,2	0,2125	0,4125	2,6	230.400	0,9	1,7	150	96.000	0,375	41,67%	2,0750	80	
9	57600	0,225	0,2125	0,4375	3,0375	288.000	1,125	1,9125	170	108.800	0,425	37,78%	2,3375	90	
10	64000	0,25	0,2125	0,4625	3,5	352.000	1,375	2,125	190	121.600	0,475	34,55%	2,6000	100	
11	70400	0,275	0,2125	0,4875	3,9875	422.400	1,65	2,3375	210	134.400	0,525	31,82%	2,8625	110	
12	76800	0,3	0,2125	0,5125	4,5	499.200	1,95	2,55	230	147.200	0,575	29,49%	3,1250	120	
13	83200	0,325	0,2125	0,5375	5,0375	582.400	2,275	2,7625	250	160.000	0,625	27,47%	3,3875	130	
14	89600	0,35	0,2125	0,5625	5,6	672.000	2,625	2,975	270	172.800	0,675	25,71%	3,6500	140	
15	96000	0,375	0,2125	0,5875	6,1875	768.000	3	3,1875	290	185.600	0,725	24,17%	3,9125	150	
16	102400	0,4	0,2125	0,6125	6,8	870.400	3,4	3,4	310	198.400	0,775	22,79%	4,1750	160	
17	108800	0,425	0,2125	0,6375	7,4375	979.200	3,825	3,6125	330	211.200	0,825	21,57%	4,4375	170	
18	115200	0,45	0,2125	0,6625	8,1	1.094.400	4,275	3,825	350	224.000	0,875	20,47%	4,7000	180	
19	121600	0,475	0,2125	0,6875	8,7875	1.216.000	4,75	4,0375	370	236.800	0,925	19,47%	4,9625	190	
20	128000	0,5	0,2125	0,7125	9,5	1.344.000	5,25	4,25	390	249.600	0,975	18,57%	5,2250	200	

Tabela A.1.b – Simulação de tempo de retardo acumulado num segmento típico

**Simulação de Tempo de Retardo na Rede Bluetooth**

**ramo primário**

- 10** M=média de medidores por nó
- 256** Kbps **tmd**= taxa máxima de dados em kbits/s
- 80** bytes **Rm**=registro de medição
- 6400** bits **VI**= volume local de um nó
- 520** slots **tg**= tempo de gerenciamento de tarefas diversas 0,325 segundos **tgp**= 520 slots 0,325
- 0,5** **Ps**=probabilidade de sucesso na sincronização de slave
- Te**= tempo médio de espera para obter sincronização de slave
- Vg**= volume global do nó ( Vg do nó anterior + VI do nó corrente) em bits
- Vg inicial** = 0
- 80 slots** **Tw**=tempo de janela de sincronização de slave em cada piconet 0,05 segundos **twp**= 80 slots 0,05
- Trp**= tempo de retardo em nó primário
- TrsAcum**= tempo de retardo acumulado
- qmedp**=quantidade média de medidores em nós do ramo primário
- Vas**=volume agregado dos ramos secundários
- 2** **QRs**=quantidade de ramos secundários por nó master
- TrtAcum**= tempo de retardo acumulado no ramo primário
- qMedS**= quantidade de medidores acumulada pelos ramos secundários
- 20** **qNRS**= quantidade de nós no ramo secundário

varia conforme tamanho do segto secundário

**tepAcum**= tempo de espera acumulado para tx em paralelo

**FP**= fator de calculo de volume para tx em paralelo

**xxAP**= variável ajustada para tx em paralelo

**qMedAcum**= quantidade acumulada de medidores no segmento

**TrtAcumAP**= tempo de retardo acumulado no segmento

128000												tx em paralelo no ramo primário e no ramo secundário									
Ramo primário		c/ ramos secundários		20	nós		Tx paralela entre os secundários e serializada no ramo primário					tx em paralelo no ramo primário e no ramo secundário									
0	1	0	1	VI	Vas	Vg	Ttx	Te	Trp	TrtAcum	qmedp	qMedS	qMedAcum	VgAcum	TtxAcum	TepAcum	FP	VgAcumAP	TtxAP	TtxAP	TrtAcumAP
bits	bits	bits	bits	bits	bits	s	s	s	s	s											
0	0	0	0	6400	256.000	0	1,025	0,3375	1,3625	19	10	200	0	262.400	0	0	200	262.400	1,025	100,00%	11,8125
1	1	0	0	6400	0	268.800	1,05	0,3375	1,3875	21,75	10	0	410	531.200	2,075	0,675	830	531.200	2,075	100,00%	13,2000
0	2	0	0	6400	256.000	531.200	2,075	0,3375	2,4125	24,1625	10	400	830	1.062.400	4,15	1,0125	1250	800.000	3,125	75,30%	14,5875
1	3	0	0	6400	0	537.600	2,1	0,3375	2,4375	26,6	10	0	840	1.600.000	6,25	1,35	1670	1.068.800	4,175	66,80%	15,9750
0	4	0	0	6400	256.000	800.000	3,125	0,3375	3,4625	30,0625	10	400	1250	2.400.000	9,375	1,6875	2090	1.337.600	5,225	55,73%	17,3625
1	5	0	0	6400	0	806.400	3,15	0,3375	3,4875	33,55	10	0	1260	3.206.400	12,525	2,025	2510	1.606.400	6,275	50,10%	18,7500
0	6	0	0	6400	256.000	1.068.800	4,175	0,3375	4,5125	38,0625	10	400	1670	4.275.200	16,7	2,3625	2930	1.875.200	7,325	43,86%	20,1375
1	7	0	0	6400	0	1.075.200	4,2	0,3375	4,5375	42,6	10	0	1680	5.350.400	20,9	2,7	3350	2.144.000	8,375	40,07%	21,5250
0	8	0	0	6400	256.000	1.337.600	5,225	0,3375	5,5625	48,1625	10	400	2090	6.688.000	26,125	3,0375	3770	2.412.800	9,425	36,08%	22,9125
1	9	0	0	6400	0	1.344.000	5,25	0,3375	5,5875	53,75	10	0	2100	8.032.000	31,375	3,375	4190	2.681.600	10,475	33,39%	24,3000
0	10	0	0	6400	256.000	1.606.400	6,275	0,3375	6,6125	60,3625	10	400	2510	9.638.400	37,65	3,7125	4610	2.950.400	11,525	30,61%	25,6875
1	11	0	0	6400	0	1.612.800	6,3	0,3375	6,6375	67	10	0	2520	11.251.200	43,95	4,05	5030	3.219.200	12,575	28,61%	27,0750
0	12	0	0	6400	256.000	1.875.200	7,325	0,3375	7,6625	74,6625	10	400	2930	13.126.400	51,275	4,3875	5450	3.488.000	13,625	26,57%	28,4625
1	13	0	0	6400	0	1.881.600	7,35	0,3375	7,6875	82,35	10	0	2940	15.008.000	58,625	4,725	5870	3.756.800	14,675	25,03%	29,8500
0	14	0	0	6400	256.000	2.144.000	8,375	0,3375	8,7125	91,0625	10	400	3350	17.152.000	67	5,0625	6290	4.025.600	15,725	23,47%	31,2375
1	15	0	0	6400	0	2.150.400	8,4	0,3375	8,7375	99,8	10	0	3360	19.302.400	75,4	5,4	6710	4.294.400	16,775	22,25%	32,6250
0	16	0	0	6400	256.000	2.412.800	9,425	0,3375	9,7625	109,5625	10	400	3770	21.715.200	84,825	5,7375	7130	4.563.200	17,825	21,01%	34,0125
1	17	0	0	6400	0	2.419.200	9,45	0,3375	9,7875	119,35	10	0	3780	24.134.400	94,275	6,075	7550	4.832.000	18,875	20,02%	35,4000
0	18	0	0	6400	256.000	2.681.600	10,475	0,3375	10,8125	130,1625	10	400	4190	26.816.000	104,75	6,4125	7970	5.100.800	19,925	19,02%	36,7875
1	19	0	0	6400	0	2.688.000	10,5	0,3375	10,8375	141	10	0	4200	29.504.000	115,25	6,75	8390	5.369.600	20,975	18,20%	38,1750

## Simulação de Tempo de Retardo na Rede Bluetooth

### Ramo secundário: tabela A.1.a

Neste caso a tabela mostra uma simulação de resultados para um ramo secundário com até 20 nós de comprimento.

A primeira coluna da tabela A.1.a, sem rótulo, identifica a quantidade de nós ( $n$ ) no ramo secundário.

O primeiro bloco de colunas se refere ao cálculo correspondente à hipótese de transmissão parcialmente serializada e o bloco seguinte (amarelo mais claro) se refere à hipótese de transmissão em paralelo.

A seguir serão descritas as demais colunas.

**Coluna  $Vg$**  : volume de dados global acumulado no nó  $j$  corrente , em bits, dado por:

$$Vg_j = Vg_{j-1} + VI \quad \text{para } j = 0, n$$

sendo  $Vg_0 = \text{zero}$

**Coluna  $Ttx$**  : tempo de transmissão de  $Vg$ , do nó  $j$  para o nó  $j+1$  no ramo secundário, em segundos, dado por

$$Ttx_j = \left[ \frac{Vg_j}{tmd} \right] \times \frac{1}{1000} \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna  $Te$**  : tempo médio de espera para obter sincronização de *slave* em cada nó, em segundos, dado por

$$Te_j = [1 - PS] \times \left[ \frac{Tw}{2} \right] + tg \quad \text{para } j = 1, n$$

Neste caso o parâmetro  $PS$  (probabilidade de sucesso na sincronização de *slave*) será sempre de 50%, pois, em função da estrutura adotada, um *slave* estará sempre sendo compartilhado por apenas duas *piconets*. Portanto, se o *slave* compartilhado não estiver presente na primeira *piconet*, ele estará presente na segunda *piconet*, lá ficando, em média, a

metade do tempo definido para o parâmetro  $T_w$  (tempo de janela de sincronização em cada *piconet*). O parâmetro  $t_g$  se refere ao tempo que o dispositivo usa para executar outras tarefas.

**Coluna Trs** : tempo de retardo em cada nó secundário, em segundos, dado por

$$Trs_j = Ttx_j + Te_j \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna TrsAcum** : tempo de retardo acumulado no ramo secundário até o nó  $j$  para a hipótese de transmissão parcialmente serializada, em segundos, dado por

$$TrsAcum_j = Trs_j + TrsAcum_{j-1} \quad \text{para } j = 0, n$$

sendo  $TrsAcum_0 = zero$

**Coluna VgAcum** : volume de dados global acumulado até o nó  $j$ , em bits, dado por

$$VgAcum_j = Vg_j + VgAcum_{j-1} \quad \text{para } j = 0, n$$

sendo  $VgAcum_0 = zero$

**Coluna TtxAcum** : tempo de transmissão de  $VgAcum_j$ , em segundos, dado por

$$TtxAcum_j = \left[ \frac{VgAcum_j}{tmd} \right] \times \frac{1}{1000} \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna TepAcum** : tempo médio de espera acumulado até o nó  $j$  do ramo secundário, em segundos, dado por

$$TepAcum_j = [1 - Ps] \times \left[ \frac{twp}{2} \right] + tgp + TepAcum_{j-1} \quad \text{para } j = 0, n$$

sendo  $TepAcum_0 = zero$

Neste caso o parâmetro  $PS$  (probabilidade de sucesso na sincronização de *slave*) será sempre de 50%, pois, em função da estrutura adotada, um *slave* estará sempre sendo compartilhado por apenas duas *piconets*. Portanto, se o *slave* compartilhado não estiver presente na primeira *piconet*, ele estará presente na segunda *piconet*, lá ficando, em média, a metade do tempo definido para o parâmetro  $twp$  (tempo de janela de sincronização em cada *piconet*). O parâmetro  $tgp$  se refere ao tempo que o dispositivo usa para executar outras tarefas.

**Coluna FP :** fator de cálculo de volume de dados para transmissão em paralelo num ramo secundário com  $j$  nós, dado por

$$FP_j = M + [(j-1) \times (M \times 2)] \quad \text{para } j = 1, n$$

Esta fórmula é obtida de forma indutiva, pela observação da quantidade de pares de nós que podem ser simultaneamente formados num segmento de rede com  $j$  nós e da quantidade de ciclos de tempo necessários para que todas as ( $M$ ) mensagens de cada nó possam ser encaminhadas desde cada nó de origem até o nó destino (no caso, um dos extremos do segmento). Em cada ciclo de tempo podem existir diversas transmissões simultâneas, cuja quantidade varia conforme o tamanho do segmento (quantidade de pares formados) e de acordo com a progressão do encaminhamento das mensagens. Entretanto, em cada ciclo de tempo é considerado apenas o volume de transmissão de um dos pares formados (cujo volume será dado pelo dobro de  $M$ , com exceção do primeiro ciclo). A somatória desses volumes irá resultar no fator de cálculo de volume ( $FP$ ), que é na verdade a quantidade de mensagens a ser usada (na coluna seguinte) como base para cálculo do tempo de transmissão de todas as mensagens no segmento, uma vez que parte delas são transmitidas em paralelo e por essa razão o respectivo tempo de transmissão é desprezado.

**Coluna VgAcumAP :** volume de dados global acumulado (em *bits*) para ramo secundário com  $j$  nós, ajustado para transmissão em paralelo, dado por

$$VgAcumAP_j = FP_j \times Rm \times 8 \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna TtxAP** : tempo de transmissão de  $VgAcumAP_j$  no ramo secundário, do nó  $j$  para o nó  $j+1$ , em segundos, dado por

$$TtxAP_j = \left[ \frac{VgAcumAP_j}{tmd} \right] \times \frac{1}{1000} \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna TtxAP/TtxAcum** : mostra o percentual de redução do tempo de transmissão no ramo secundário considerando o regime e transmissão em paralelo em relação ao regime de transmissão parcialmente serializada.

**Coluna TrsAcumAP** : tempo de retardo acumulado no ramo secundário, com  $j$  nós, em segundos, considerando o regime de transmissão em paralelo, dado por

$$TrsAcum_j = TtxAP_j + TepAcum_j \quad \text{para } j = 1, n$$

obs.: esse valor será também usado na parte *b* da tabela A.1

**QmedAcum** : quantidade acumulada de medidores no ramo secundário, dado por

$$QmedAcum_j = M + QmedAcum_{j-1} \quad \text{para } j = 0, n$$

sendo  $QmedAcum_0 = \text{zero}$

obs.: esse valor será também usado na parte *b* da tabela A.1

A seguir serão descritas as colunas da tabela A.1.b que apresenta os cálculos relativos ao ramo primário e seus respectivos ramos secundários, para se obter a estimativa de tempo de retardo acumulado num segmento típico.

## Simulação de Tempo de Retardo na Rede Bluetooth

### Ramo primário: tabela A.1.b

Neste caso a tabela mostra uma simulação de resultados para um segmento composto por um ramo primário com até 20 nós de comprimento e dois ramos secundários de 20 nós de

comprimento ligados a cada raiz secundária (conforme modelo de segmento típico, mostrado na figura 4.9).

A primeira coluna da tabela A.1.b, sem rótulo, é apenas um elemento auxiliar que indica se o nó corrente ( $j$ ) possui (valor 1) ou não possui (valor 0) ramos secundários subordinados. A segunda coluna (também sem rótulo) identifica a quantidade de nós ( $n$ ) no ramo secundário.

O primeiro bloco de colunas se refere ao cálculo correspondente à hipótese de transmissão parcialmente serializada, e o bloco seguinte (em verde), se refere à hipótese de transmissão em paralelo.

A seguir serão descritas as demais colunas dessa planilha.

**Coluna VI :** volume de dados local de um nó (em *bits*); é um parâmetro de entrada dado por

$$VI = M \times Rm \times 8$$

**Coluna Vas :** volume de dados agregados dos ramos secundários (se existirem) que têm origem no nó corrente. Genericamente é dado por

$$Vas = [Vg_n]^{\text{ramo secundário}} \times Qrs \quad \text{onde } n = qNRS$$

Neste caso específico foram definidos ramos secundários de 20 nós ( $qNRA=20$ ), portanto  $Vg_{20}$  é o valor transportado da parte *a* da tabela A.1, que corresponde aos cálculos relativos ao ramo secundário.

**Coluna Vg :** volume de dados global acumulado no nó corrente  $j$ , em bits, dado por

$$Vg_j = VI + Vas_j + Vg_{j-1} \quad \text{para } j = 0, n$$

sendo  $Vg_0 = \text{zero}$

**Coluna Ttx :** tempo de transmissão de **Vg**, do nó  $j$  para o nó  $j+1$ , em segundos, dado por

$$Ttx_j = \left[ \frac{Vg_j}{tmd} \right] \times \frac{1}{1000} \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna Te** : tempo médio de espera para obter sincronização de *slave* em cada nó, em segundos, dado por

$$Te_j = [1 - Ps] \times \left[ \frac{Tw}{2} \right] + tg \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna Trp** : tempo de retardo em cada nó primário, em segundos, dado por

$$Trp_j = Ttx_j + Te_j \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna TrtAcum** : tempo de retardo acumulado no ramo primário até o nó  $j$ , em segundos, para a hipótese de transmissão parcialmente serializada (com chegada simultânea dos dados oriundos dos ramos secundários), dado por

$$TrtAcum_j = Trp_j + TrtAcum_{j-1} \quad \text{para } j = 0, n$$

sendo  $TrtAcum_{j=0} = [TrsAcum_{qNRS}]^{\text{ramo sec.}} \times QRs$

**Coluna qmedp** : quantidade média de medidores por nó no ramo primário. É o mesmo valor do parâmetro de entrada M.

**Coluna qMedS** : quantidade de medidores existentes nos ramos secundários que têm origem no nó corrente (quando este os tiver), dado por

$$qMedS = QRs \times [QmedAcum_n]^{\text{ramo secundário}} \quad \text{onde } n = qNRS$$

**Coluna VgAcum** : volume de dados global acumulado no ramo primário, em bits, até o nó  $j$ . Corresponde aos valores acumulados da coluna  $Vg^{\text{ramo primário}}$ , sendo dado por

$$VgAcum_j = [Vg_j]^{\text{ramo primário}} + VgAcum_{j-1} \quad \text{para } j = 0, n$$

onde  $VgAcum_0 = \text{zero}$

**Coluna TtxAcum** : tempo de transmissão de  $VgAcum_j$  no ramo primário, em segundos, dado por

$$TtxAcum_j = \left[ \frac{VgAcum_j^{\text{ramo primário}}}{tmd} \right] \times \frac{1}{1000} \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna TepAcum** : tempo de espera acumulado até o nó  $j$  do ramo primário, em segundos, dado por

$$TepAcum_j = [1 - Ps] \times \left[ \frac{twp}{2} \right] + tgp + TepAcum_{j-1} \quad \text{para } j = 0, n$$

sendo  $TepAcum_0 = \text{zero}$

**Coluna FP** : fator de cálculo de volume de dados para transmissão em paralelo num ramo primário com  $j$  nós, dado por

$$FP_j = M + qMedS_{j-1} + [(j-1) \times [(Qrs \times M) + (QRs \times TqMed)]] \quad \text{para } j = 1, n$$

onde

$$TqMed = QmedAcum_{qNRS}^{\text{ramo secundário}}$$

Esta fórmula é semelhante a que foi derivada na coluna FP do ramo secundário. A diferença básica, neste caso, está na determinação da quantidade de mensagens de cada nó do ramo primário, que agora pode incorporar o volume de mensagens acumuladas nos respectivos nós secundários (quando existirem) que tem origem num nó primário, além das mensagens geradas no próprio nó primário.

**Coluna VgAcumAP** : volume de dados global acumulado (em *bits*) para ramo primário com  $j$  nós, ajustado para transmissão em paralelo, dado por

$$VgAcumAP_j = FP_j \times Rm \times 8 \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna TtxAP** : tempo de transmissão de  $VgAcumAP_j$  no ramo primário, do nó  $j$  para o nó  $j+1$ , em segundos, dado por

$$TtxAP_j = \left[ \frac{VgAcumAP_j}{tmd} \right] \times \frac{1}{1000} \quad \text{para } j = 1, n$$

**Coluna TtxAP/TtxAcum** : mostra o percentual de redução do tempo de transmissão no ramo primário, considerando o regime em paralelo em relação ao regime parcialmente serializado.

**Coluna TrtAcumAP** : tempo de retardo acumulado no segmento, formado por ramo primário com  $j$  nós, em segundos, considerando o regime de transmissão em paralelo, dado por

$$TrtAcum_j = TtxAP_j + TepAcum_j + \left[ TrsAcumAP_{qNRS}^{r.sec.} \times QRs \right] \\ \text{para } j = 1, n$$

A seguir serão abordados os detalhes de cálculo para se fazer uma estimativa de tempo de retardo acumulado para toda uma área de cobertura.

## **Simulação de Tempo de Retardo na Rede Bluetooth**

### **Estimativa para uma área com um concentrador e 4 segmentos típicos**

Com base na estimativa do tempo de retardo acumulado para um segmento típico é feita uma estimativa de retardo para toda a área atendida pelo concentrador, de acordo com a configuração estabelecida (neste caso 4 segmentos em estrela).

Para tanto, é necessário se levar em conta que, em princípio todos os segmentos de um concentrador trabalham em paralelo, ou seja, as transmissões entre duplas de nós em diferentes segmentos podem ocorrer simultaneamente. Entretanto, o grau de paralelismo não é total, pois os nós adjacentes ao concentrador, apesar de pertencerem a diferentes segmentos,

também fazem parte de uma mesma *piconet*, cujo *master* é o próprio concentrador, o que significa que as transmissões desses nós com concentrador não podem ocorrer de forma simultânea. Portanto, é preciso considerar que existe ali uma certa contenção. Desse modo, a estimativa do tempo de retardo na rede Bluetooth formada por um concentrador (**TrtRedeBT**) é dada por:

$$TrtRedeBT = TrtAcumAP + \left[ 3 \times \frac{TrtAcumAP}{2} \right]$$

Essa estimativa pode ser entendida, intuitivamente, imaginando-se que o processo fosse feito da seguinte forma: enquanto um segmento “domina” o concentrador enviando todas as suas mensagens, os demais segmentos têm suas mensagens encaminhadas em paralelo somente até o nó imediatamente anterior ao nó do concentrador, onde ficam “retidas”. A partir desse ponto as mensagens de cada segmento são enviadas de forma serializada para o concentrador.