

# Um Protocolo de Formação de Rotas para Redes de Sensores usando Bluetooth

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

**Resumo** — Neste trabalho propomos um protocolo para descoberta de dispositivos e formação de rotas em redes de sensores usando tecnologia Bluetooth. O protocolo especifica um nó de gerência responsável pelo processo de descoberta de dispositivos e manutenção da tabela de roteamento. Após a descoberta dos nós e das rotas, todos os enlaces são desconectados, eliminando a necessidade de gerenciamento da scatternet. Este protocolo é apropriado para aplicações de sensoriamento que demandam baixas taxas de transmissão. Um cenário de estudo é proposto e analisado através de simulação.

**Palavras-Chave** — Bluetooth, formação de scatternets, redes de sensores, roteamento.

**Abstract** — This paper proposes a new protocol for device searching and route building in sensor networks using the Bluetooth technology. A management node responsible for searching the devices and maintaining the route table is specified by the protocol. When all the nodes and routes are found, all links are disconnected, thus making scatternet management unnecessary. This protocol fits sensor applications that require low transmission rates. A study scenario is then proposed and analyzed through simulation.

**Index terms** — Bluetooth, scatternet formation, sensor networks, routing.

## I. INTRODUÇÃO

Bluetooth é uma tecnologia emergente [1] para redes sem fio de comunicação pessoal de curta distância (WPAN). Os dispositivos Bluetooth operam na banda de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz utilizando a técnica de espalhamento espectral com saltos de frequência. A banda ISM também é utilizada pelos dispositivos de redes locais sem fio (WLAN). O objetivo da tecnologia Bluetooth não é competir com o padrão WLAN quanto ao uso de espectro e aplicações, mas sim operar em conjunto e aumentar os cenários de uso. A taxa de transmissão em enlaces Bluetooth chega a 1Mbps, usando modulação GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*). O protocolo MAC do Bluetooth foi projetado para facilitar a formação de redes ad-hoc. Esta característica torna a tecnologia Bluetooth atrativa para aplicações em redes de sensores [2]. Os dispositivos podem se comunicar formando uma rede de até oito nós, chamada de *piconet*. Numa *piconet*, um dispositivo assume o papel de mestre e os outros de escravos. Dispositivos em diferentes *piconets* podem se comunicar usando uma estrutura chamada *scatternet*. O canal é dividido em quadros de tempo de 625 $\mu$ s. Um esquema TDD (*Time-Division Duplexing*) é usado para operação bidirecional.

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

As redes de sensores sem fio são aplicações recentes de redes ad hoc e que devem ter um grande desenvolvimento nos próximos anos. Os protocolos e algoritmos de redes de sensores devem ter capacidades de auto-organização [2]. Um nó sensor deve possuir componentes para sensoriamento, processamento de dados e comunicação. Alguns exemplos de aplicações destas redes são o monitoramento ambiental em locais como florestas e oceanos, teste de qualidade de produtos num ambiente industrial, telemetria, localização e monitoramento de médicos e pacientes num hospital. Em geral, as redes de sensores diferem das redes ad hoc em alguns aspectos [2]: o número de nós sensores pode ser muito grande; os sensores são mais suscetíveis a falhas; a topologia da rede pode mudar rapidamente; os nós sensores são limitados em capacidade computacional, memória e principalmente, energia.

O desenvolvimento de novos protocolos MAC para redes de sensores e a utilização de protocolos existentes é um tópico de grande importância. O protocolo MAC é responsável pela criação da infra-estrutura da rede e pelo compartilhamento dos recursos de comunicação entre os nós. Algumas propostas de utilização do Bluetooth como protocolo de acesso ao meio foram feitas em [3], [4] e [5]. Em [3] e [4] foi implementada uma rede de sensores que consiste de apenas uma *piconet*. Em [4] os nós sensores são os escravos da *piconet* e um computador é o mestre, que funciona como um equipamento de armazenamento dos dados. Esta abordagem tem a limitação de oito nós (um mestre e sete escravos). Para montar uma rede de sensores com mais nós, um algoritmo de formação de scatternets precisa ser utilizado. Existem muitas propostas recentes na literatura para formação e roteamento de scatternets.

Em [5] uma rede de sensores com Bluetooth foi implementada usando o algoritmo *BlueTree* [6]. Outros protocolos de formação de scatternets podem ser usados, como o *BlueStars* [7], *BlueRings* [8] e *BlueNet* [9]. A principal desvantagem destes algoritmos é que os nós permanecem conectados todo o tempo, mesmo que não tenham dados para enviar. Isto pode desperdiçar energia nos nós e não é adequado para redes de sensores. Além disso, a gerência de entrada e saída de nós na scatternet é uma tarefa complexa, especialmente em casos de mobilidade que geram mudanças frequentes na topologia da scatternet. Em redes com muitos nós móveis, a sobrecarga de informação de gerência usada para manter a scatternet conectada pode ser bastante grande. Uma abordagem diferente foi proposta em [10], chamada *scatternet-route*. As *scatternets* são formadas apenas por demanda de tráfego, sem a necessidade de manter enlaces conectados desnecessariamente. A formação da *scatternet* é similar aos protocolos de roteamento ad hoc por demanda. A *scatternet* só é mantida enquanto há fluxo de

tráfego, sendo totalmente desconectada após o fim da troca de dados. Esta abordagem é mais adequada para dispositivos com limite de energia e para aplicações com alto volume de tráfego, como dados em tempo real. Para redes de sensores, a economia de energia do algoritmo é uma característica desejável. Porém em redes de sensores o tráfego é normalmente baixo [2] e formar uma scatternet para a troca de alguns poucos pacotes pode não ser a melhor solução. Outra desvantagem é que quando um nó quer enviar dados, a rota tem que ser descoberta e a scatternet formada. Ainda que o Bluetooth não tenha sido desenvolvido especificamente para redes de sensores, algumas de suas características o tornam uma excelente alternativa. O processo de descoberta de dispositivos, modos de economia de energia e baixo custo são algumas vantagens sobre outras tecnologias. No entanto, a questão de formação de scatternets e roteamento nestas redes continua em aberto e precisa ser tratada para que redes de sensores usando Bluetooth sejam implementadas. Neste trabalho propomos um novo protocolo de formação de rotas para redes de sensores usando dispositivos Bluetooth, focando aplicações que demandam baixo fluxo de dados e toleram atraso na descoberta de rotas. Este protocolo é derivado do *scatternet-route* [10]. Como estudo de caso, um cenário de aplicação para monitoramento e localização de pessoas é descrito e analisado. Este cenário abrange várias aplicações práticas de redes de sensores, como monitorar médicos e pacientes num hospital, coletar informação de telemetria, entre outras.

## II. NOVO PROTOCOLO PARA FORMAÇÃO DE ROTAS EM APLICAÇÕES DE SENSORIAMENTO

Como as redes de sensores possuem inúmeras aplicações, o algoritmo de formação deve levar em conta as especificidades de cada tipo cenário. Para o protocolo de formação de redes de sensores foram consideradas aplicações onde há um nó, chamado nó de gerência, responsável pela coleta ou envio de dados para os sensores. O fluxo de dados será sempre do nó de gerência para um sensor ou de um sensor para o nó de gerência. O nó de gerência inicia o processo de descoberta de nós e a formação da rede. O objetivo é dar ao nó de gerência uma visibilidade geral da rede para que possa construir uma tabela de roteamento. Depois de um período para descobrir os nós e rotas, os nós sensores não precisam permanecer conectados numa scatternet, economizando energia. Já os protocolos propostos em [6], [7], [8] e [9] mantêm a scatternet formada. Uma diferença fundamental do protocolo proposto em relação ao *scatternet-route* [10] é que quando o nó de gerência quer enviar ou coletar informações de um sensor, ele já sabe a rota e pode enviar os dados sem um tempo extra de descoberta da rota. Na realidade, a *scatternet* nunca será formada. É formada apenas uma *piconet* temporária entre dois dispositivos. Um nó se conecta com outro, envia os dados e se desconecta novamente. Isto elimina também a necessidade de algoritmos de escalonamento, tanto intrapiconet como interpiconet. Esta solução é detalhada a seguir.

O estabelecimento de um enlace entre dispositivos Bluetooth requer dois procedimentos: *inquiry* e *page*. O

processo de *inquiry* é usado para descobrir os dispositivos vizinhos e para obter seus dados (endereço e relógio). Um dispositivo deve estar no estado de *inquiry* (mestre) e o outro no estado *inquiry scan* (escravo). A mensagem de *inquiry* é um pacote ID de 68 bits. O processo de *page* é similar: o mestre (no estado de *page*) pode fazer a conexão com outro nó (no estado *page scan*) usando o endereço e relógio obtidos no processo de *inquiry*. O mestre deve ficar no estado de *inquiry* por 10,24s para receber todas as possíveis respostas de seus nós vizinhos num ambiente livre de erros [1]. O processo de *page* dura no máximo um intervalo de *page scan* (1,28s para o modo R1) [1]. Os modos R0 e R3 têm intervalos diferentes. Para a formação da rede, o nó de gerência deve estar no estado de *inquiry* e todos os nós sensores no estado *inquiry scan*. Os fluxogramas do protocolo são mostrados na Figura 1.

O pacote ID transmitido durante o processo de *inquiry* deverá ter algumas informações adicionais: o endereço do dispositivo Bluetooth (BD\_ADDR, 48 bits) e o relógio (26 bits). Estes dados permitem uma descoberta simétrica dos nós. Como exposto em [10], mais 144 bits podem ser adicionados na mensagem de *inquiry* e isto também foi usado no algoritmo de formação do *scatternet route*. Quando um nó sensor recebe uma mensagem de *inquiry*, ele responde ao *inquiry*, armazena o endereço e relógio do pacote ID recebido e muda para o estado de *inquiry*. Quando um nó recebe respostas para seu *inquiry*, ele armazena a informação (endereço e relógio) destes dispositivos. Um nó que muda para o estado de *inquiry* não responderá a outros dispositivos fazendo *inquiry*. Assim, cada nó responderá para apenas um dispositivo.

Um nó no estado de *inquiry* permanece fazendo esta operação por 10,24 s (para obter todas as respostas possíveis) e depois deste tempo tem duas possibilidades: mudar para o estado de *page* ou *page scan*. Se o nó recebeu pelo menos uma resposta ao seu *inquiry*, muda para o estado *page scan* e espera pelo nó (ou nós) que responderam seu *inquiry* para um processo de *page*. Se o nó não recebeu nenhuma resposta para seu *inquiry*, muda para o estado de *page* e faz o *page* do nó superior (o nó a quem ele enviou uma resposta de *inquiry*). Cada nó no estado *page scan* que recebe um *page* de um vizinho também fará o *page* de seu nó superior enviando a informação (relógio e endereço) de todos os seus vizinhos.

Este processo irá terminar no nó de gerência, que está no estado de *page scan*, esperando que seus vizinhos enviem informações sobre a rede. O processo de *page* forma uma conexão entre os nós, mas esta conexão é rompida imediatamente após a transmissão das informações. O nó de gerência recebe os endereços e relógios de todos os nós sensores. O processo de descoberta pode ser feito a qualquer momento pelo nó de gerência para atualizar as informações de topologia da rede, devido à inclusão ou remoção de nós na rede.

Para cada nó sensor o gerenciador saberá sobre seus vizinhos, podendo construir uma tabela de roteamento e estabelecer uma rota para qualquer nó. Neste processo existe apenas uma rota para cada nó. Depois deste processo nenhum nó permanece conectado. Quando o nó de gerência quer coletar ou enviar dados para um sensor, ele procura a rota na

tabela de roteamento. O gerenciador faz o *page* e envia os dados para o primeiro dispositivo, que se desconecta do nó de gerência, faz o *page* e envia as informações para o próximo nó e assim sucessivamente até o destino. Nenhuma *scatternet* é formada neste processo. Se um nó sensor quer enviar dados, faz o *page* do seu nó superior e transmite os dados. O seu nó superior faz o mesmo até que o nó de gerência seja alcançado.

Embora não exista um atraso para descoberta de rota, o processo de *page* acrescenta um tempo extra quando um nó precisa enviar dados (atraso médio de *page* de  $1,28/2 = 0,64s$  por nó). Por exemplo, se a rota tem três saltos (nós), um tempo de 1,92s é adicionado. Este tempo sempre será menor que o da *scatternet route* [10], que precisa fazer todo o processo de descoberta da rota antes de enviar dados.

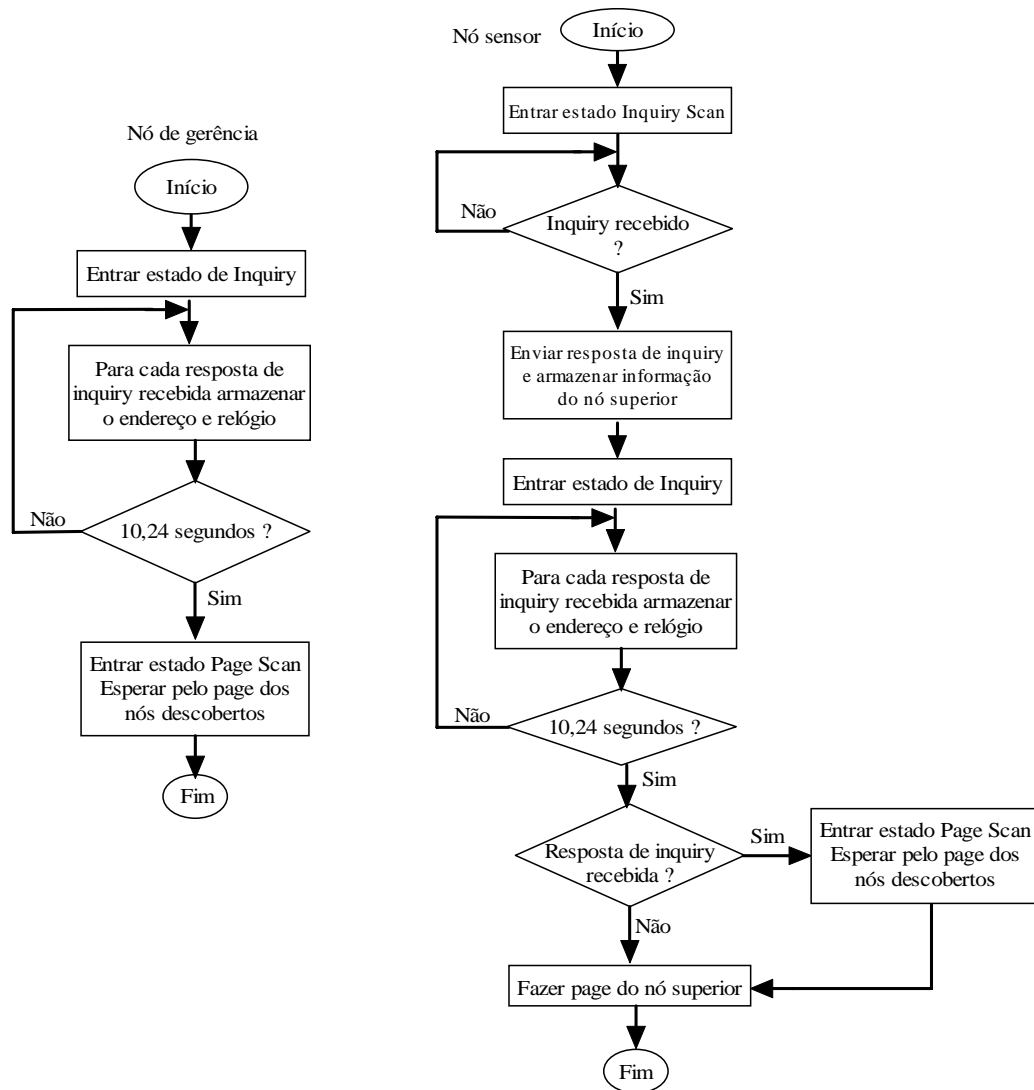


Fig. 1. Fluxogramas do processo de descoberta

### III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Um simulador orientado a eventos foi desenvolvido em C++ para avaliar o desempenho do protocolo proposto. Os nós foram distribuídos geograficamente de acordo com a Figura 2. Foram considerados três cenários com diferentes distâncias. A distância  $d$  é o alcance máximo de transmissão dos nós (área de cobertura). No primeiro cenário a densidade dos nós é baixa, no segundo é média e no terceiro cenário a densidade é alta. A Figura 3 mostra o tempo médio que leva para o nó de gerência descobrir os nós e rotas (tempo médio de descoberta). Quando a densidade da rede é baixa, o tempo aumenta rapidamente com o número de nós. Redes com alta

densidade têm tempos de descoberta menores. Um exemplo das rotas descobertas com dez nós para os cenários 1 e 3 é mostrado na Figura 4 e 5, respectivamente. Depois da fase de descoberta, todos os enlaces são desconectados. Se o nó de gerência quiser enviar alguma informação de configuração ou coleta de dados para o nó sensor número 8 da rede da Figura 4, os seguintes passos vão ocorrer:

- o nó de gerência faz o *page* do nó 3 e envia os dados;
- nó 3 faz o *page* do nó 6 e transmite os dados;
- nó 6 faz o *page* do nó 8 e envia os dados.

Para completar esta tarefa, são necessários três processos de *page* (3 x 0,64s) mais o tempo para enviar os dados – que será geralmente de poucos time slots. Para muitas aplicações este tempo é aceitável. Se o nó sensor 8 quer transmitir, faz o *page* do nó 6 (seu nó superior) e assim sucessivamente até que o nó de gerência receba os dados. Para a rede da Figura 5, ainda que todos os nós estejam ao alcance uns dos outros, em muitos casos são necessários alguns saltos para uma transmissão. Se o nó de gerência quer transmitir para o sensor 5, os dados terão que passar pelos nós 6 e 9. Como o gerenciador tem informação de todos os nós, propomos uma

outra estratégia de transmissão que pode melhorar significativamente o desempenho da rede quando a densidade dos nós é alta (Cenário 3 – Figura 2).

O gerenciador pode tentar fazer o *page* de um nó verificando o segundo ou terceiro salto na tabela de roteamento. Assim, para transmitir para o nó 5, apenas um *page* seria necessário. Esta abordagem pode ser aplicada quando a densidade dos nós é alta. No exemplo da Figura 4, se o nó de gerência tem dados para enviar para o sensor 8 e tenta fazer o *page* desse nó, isto não será possível, pois o nó 8 não está ao seu alcance.

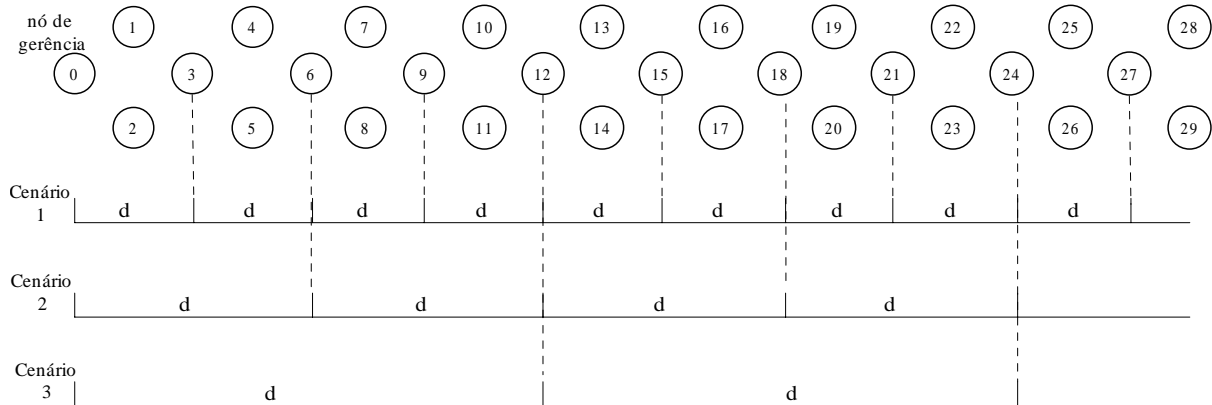


Fig. 2. Distribuição dos nós

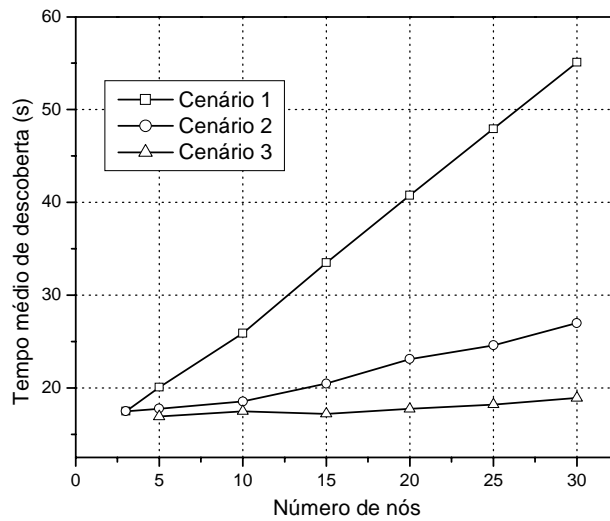


Fig. 3. Tempo médio de descoberta

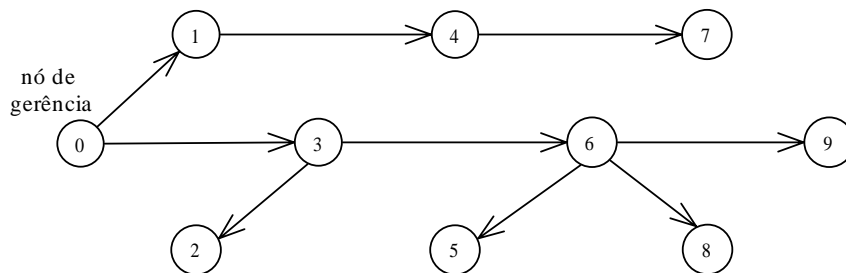


Fig. 4. Exemplo de rotas descobertas para o cenário 1 com dez nós

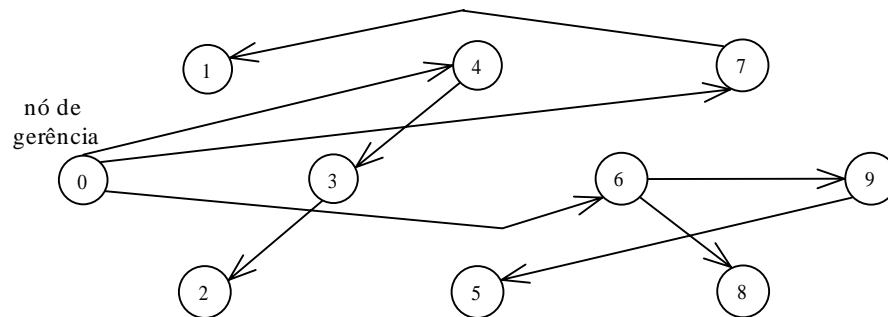


Fig. 5. Exemplo de rotas descobertas para o cenário 3 com dez nós

#### IV. ESTUDO DE CASO DE UMA REDE DE SENSORES USANDO BLUETOOTH

As redes de sensores podem ser usadas para monitorar, rastrear, coordenar e processar dados em diferentes aplicações. Podem ser implementadas em ambientes rurais e urbanos e ainda em locais internos como prédios e residências. Uma das muitas aplicações de redes de sensores é a localização de pessoas dentro de um ambiente, como um edifício ou um hospital. Num hospital, a localização e monitoramento de médicos e pacientes podem ser bastante úteis, permitindo que funcionários enviem mensagens para médicos e enfermeiros ou monitorem a distância as condições físicas de um paciente, por exemplo. Um protótipo de um sistema remoto de monitoramento de pacientes usando Bluetooth foi desenvolvido em [11], usando um sensor e um computador para receber os dados, porém sem a formação de uma rede de sensores. A idéia é ter um nó de gerência responsável em coletar e enviar dados para os nós sensores. O nó gerenciador pode ser um computador instalado numa sala. Todos os usuários do sistema têm um sensor, que pode ser um sensor de alguma condição fisiológica ou até um PDA. Como esses nós dos usuários são móveis, deve haver outros tipos de dispositivos, os pontos de acesso (PAs). Este cenário é mostrado na Figura 6, considerando 46 nós móveis.

Os PAs podem ser colocados em diferentes andares ou setores e podem ser levados de uma área para outra de acordo com as necessidades da aplicação. Este cenário também pode servir para outras aplicações que tenham pontos de acesso cobrindo uma área, como o monitoramento das condições ambientais de uma região. Os pontos de acesso seriam pontos de coleta de dados e os nós móveis, os sensores (de temperatura, umidade, etc) que podem ser colocados na região. Para a configuração da rede existem duas fases: a descoberta dos pontos de acesso e a descoberta dos nós móveis (dos usuários). Na primeira fase (Figura 1) o nó de gerência está no estado de *inquiry* e os pontos de acesso no estado *inquiry scan*. As rotas são descobertas como descrito na Seção II. Para o cenário da Figura 6 com onze PAs, o tempo médio de descoberta, obtido através de simulação, foi de 41,68 segundos. A primeira fase precisa ser executada apenas uma vez se não forem colocados outros pontos de acesso, nem movidos os existentes. Esta etapa seria a inicialização do sistema.

A segunda fase é a descoberta dos nós móveis que são os sensores carregados pelas pessoas. Este processo pode ser executado em intervalos regulares ou a qualquer momento que o gerenciador queira atualizar as informações sobre a rede. O nó de gerência faz o *page* de seus PAs vizinhos, informando que deverão também fazer o *page* dos PAs próximos a eles e entrar depois no estado de *inquiry*. Todos os PAs devem permanecer fazendo *inquiry* por  $t_{inquiry} = 10,24s$  para achar os nós dos usuários que estão no estado de *inquiry scan*. Depois do tempo de *inquiry*, os PAs retornam a informação dos nós descobertos para o gerenciador por um processo de *page*. A duração média da segunda fase é dada por

$$T_d = (2 \cdot t_{page} \cdot N_{\max \text{ saltos}}) + t_{inquiry} \quad (1)$$

O tempo médio de *page* é de 0,64s. Este tempo é multiplicado por dois (*page* no caminho de ida e volta) e somado ao tempo de *inquiry* (10,24s). Para o exemplo da Figura 6 temos o tempo  $T_d = 16,64s$ . O tempo da segunda fase é independente do número de nós móveis. O ponto de acesso fica 10,24s fazendo *inquiry* e escutando por respostas. Se houver um ou quinze nós móveis, o tempo gasto é o mesmo. O gerenciador tem uma visibilidade de todos os nós e de quais pontos de acesso estão próximos de cada usuário. Para enviar dados para um sensor o tempo médio  $T_s$  é dado por

$$T_s = t_{page} \cdot N_{saltos} \quad (2)$$

Para cinco saltos,  $T_s = 3,2$  segundos. Não está sendo considerado o tempo de transmissão, mas o volume de dados neste tipo de aplicação é pequeno e pode ser transmitido em poucos pacotes num curto período de tempo. Cada vez que os dados são enviados de um nó para o outro, a conexão é desfeita. Os nós nunca permanecem conectados e a *scatternet* nunca é formada. Apenas são formadas *piconets* temporárias.

Os nós móveis devem periodicamente tentar se conectar com o ponto de acesso a quem respondeu o *inquiry* para verificar se ainda estão ao seu alcance. Se não obtiver resposta, o nó móvel deve entrar novamente no estado *inquiry scan*. Assim o nó será descoberto por um outro ponto de acesso na próxima vez que o nó de gerência iniciar o processo de descoberta de nós dos usuários.

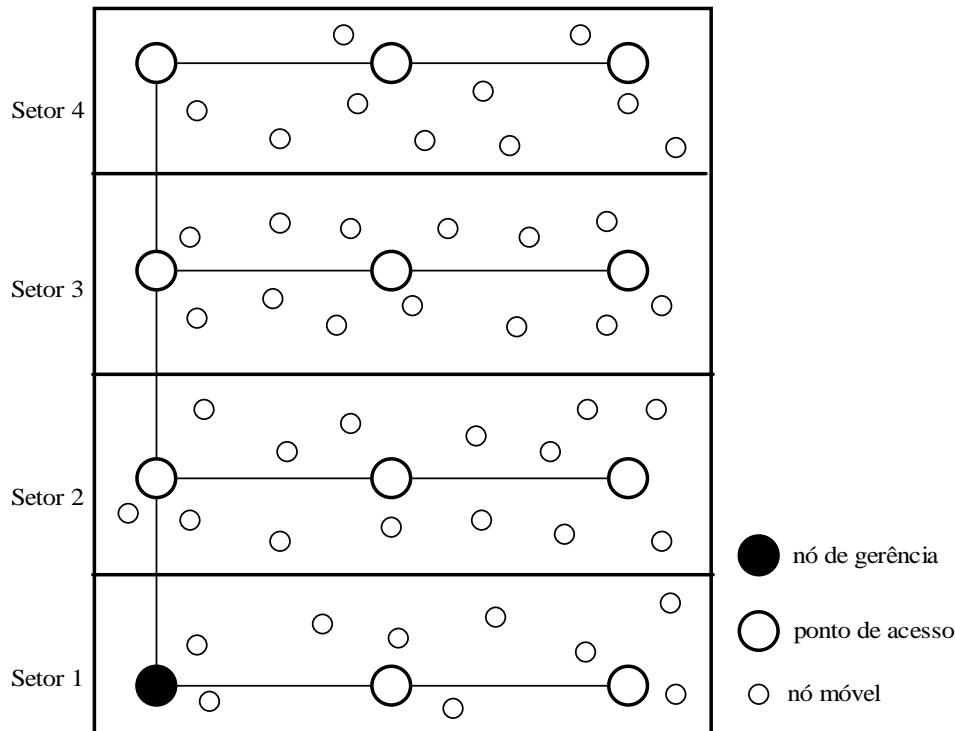


Fig. 6. Cenário de aplicação

## V. CONCLUSÕES

Neste trabalho propomos um novo protocolo para formação e roteamento em redes de sensores usando dispositivos Bluetooth. A estrutura para redes de sensores é baseada no algoritmo *scatternet-route* [10]. Foram consideradas aplicações onde há um nó responsável pelo gerenciamento da rede, que possui informação de todos os nós sensores. Quando o nó de gerência quer enviar ou coletar dados de um sensor, já possui a rota e pode enviar os dados. Neste esquema nenhuma *scatternet* é formada e os enlaces são desconectados imediatamente após o fim da comunicação. Para redes de sensores onde há poucos dados para transmitir, é mais eficiente do que manter todos os nós conectados numa grande *scatternet*. Também foi proposta uma estratégia de transmissão para redes com alta densidade de nós. Como o nó de gerência tem a informação de interconexão entre todos os nós, pode tentar fazer o *page* de um nó, considerando o segundo ou terceiro salto na tabela de roteamento. Como estudo de caso, foi proposta e analisada uma aplicação de monitoramento e localização de nós móveis dentro de edifício. Esta abordagem pode ser aplicada em vários outros cenários práticos de redes ad hoc e de sensores.

## REFERÊNCIAS

- [1] Bluetooth SIG, "Specifications of the Bluetooth system", *Core Version 1.2*, November 2003. <http://www.bluetooth.com>
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "A survey on sensor networks", *IEEE Communications Magazine*, pp. 102-114, August 2002.
- [3] O. Kasten and M. Langheinrich, "First experiences with Bluetooth in the smart-its distributed sensor network", Workshop on Ubiquitous Computing and Communications, Barcelona, Spain, September 2001.
- [4] P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, E. Sisinni and A. Taroni, "A Bluetooth-based sensor network with web interface", Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vail, CO, USA, May 2003.
- [5] M. Leopold, M. D. Dydensborg and P. Bonnet, "Bluetooth and sensor networks: a reality check", 1<sup>st</sup> ACM Conference on Sensor Systems, Los Angeles, CA, USA, November 2003.
- [6] G. Záruba, S. Basagni and I. Chlamtac, "BlueTrees – scatternet formation to enable Bluetooth-based Personal Area Networks", IEEE International Conference on Communications, Helsinki, Finland, June 2001.
- [7] C. Petrioli, S. Basagni and I. Chlamtac, "Configuring BlueStars: multihop scatternet formation for Bluetooth networks", *IEEE Trans. on Computers*, vol.52, no. 6, pp. 779-790, June 2003.
- [8] T. Lin, Y. Tseng, K. Chang and C. Tu, "Formation, routing and maintenance protocols for the BlueRing scatternet of Bluetooth", 36<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Science (HICSS-36), January 2003.
- [9] Z. Wang, R. J. Thomas and Z. Haas, "BlueNet – a new scatternet formation scheme", 35<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Science (HICSS-35), January 2002.
- [10] Y. Liu, M. J. Lee and T. N. Saadawi, "A Bluetooth scatternet-route structure for multihop ad hoc Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 2, pp. 229-239, February 2003.
- [11] J. Andreasson, M. Ekstrom, A. Fard, J. G. Castaño and T. Johnson, "Remote system for patient monitoring using Bluetooth". First IEEE International Conference on Sensors, USA, June 2002.