

Uma Aplicação de Redes de Sensores usando Bluetooth

João Henrique Kleinschmidt e Marcelo E. Pellenz

Resumo — Este artigo propõe uma rede de sensores usando Bluetooth para aplicações com baixas transmissões de dados. Um nó de gerência é responsável em descobrir e manter uma tabela de roteamento do nós sensores. Assim que os nós e rotas são descobertos, todos os enlaces são desconectados, eliminando gerenciamento desnecessário da scatternet. Resultados de simulação e análise de rede mostram que esta estratégia pode ser empregada em vários cenários de redes de sensores.

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

Abstract — This paper proposes a Bluetooth sensor network for applications with low data exchange. A manager node is responsible for discovering and maintaining a routing table of sensor nodes. Once the nodes and routes are discovered, all the links are released, eliminating unnecessary scatternet maintenance. Simulation results and network analysis show that this strategy can be employed in many sensor networks scenarios.

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 de 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 1 Mbps, 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 μ s. Um esquema TDD (*Time-Division Duplex*) é usado para operação bidirecional.

João Henrique 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: {joahhk, 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. Algumas aplicações destas redes são o monitoramento ambiental em locais como florestas e oceanos, teste de qualidade de produtos num ambiente industrial e localização e monitoramento de médicos e pacientes num hospital. Em geral, as redes de sensores diferem das redes ad hoc em alguns aspectos [AKY02]: o número de nós sensores pode ser muito grande; os sensores são mais suscetíveis à 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 tentativas de usar 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 usando 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 do mais, a 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 casos de muitos nós móveis, a sobrecarga de informação na rede usada para manter a scatternet conectada pode ser bastante grande. Uma abordagem diferente foi proposta em [LIU03], chamada *scatternet-route*. As *scatternets* são formadas apenas por demanda de tráfego, sem 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. Este artigo apresenta uma nova abordagem para de redes de sensores usando Bluetooth para aplicações que demandam poucas trocas de dados e toleram atraso na descoberta de rotas. 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. UM PROTOCOLO BLUETOOTH PARA APLICAÇÕES DE SENSORES

As redes de sensores possuem inúmeras aplicações, sendo que um algoritmo de formação deve levar em conta as especificidades de cada tipo de aplicação. Para um protocolo de formação de redes de sensores foram consideradas aplicações onde há um nó, chamado nó de gerência, responsável em coletar ou enviar 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 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 (diferente dos protocolos apresentados em [6], [7], [8] e [9]). 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, diferente da *scatternet route* [10]. 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 10,24 s para receber todas as possíveis respostas de seus nós vizinhos num ambiente livre de erros [BLU01a]. O processo de page dura no máximo um intervalo de page scan (1,28 s para o modo R1). Os modos R0 e R3 tem 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 terá algumas informações extras: 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 da 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 que se queira atualizar informações, como obter novos nós que chegaram depois do primeiro processo de descoberta.

Para cada nó sensor o gerenciador saberá 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, faz o page do primeiro nó da rota, que, por sua vez, faz o page do segundo nó e assim por diante, até que o destino é alcançado. Nenhuma scatternet é formada neste processo. 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. 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*, que precisa fazer todo o processo de descoberta da rota antes de enviar dados.

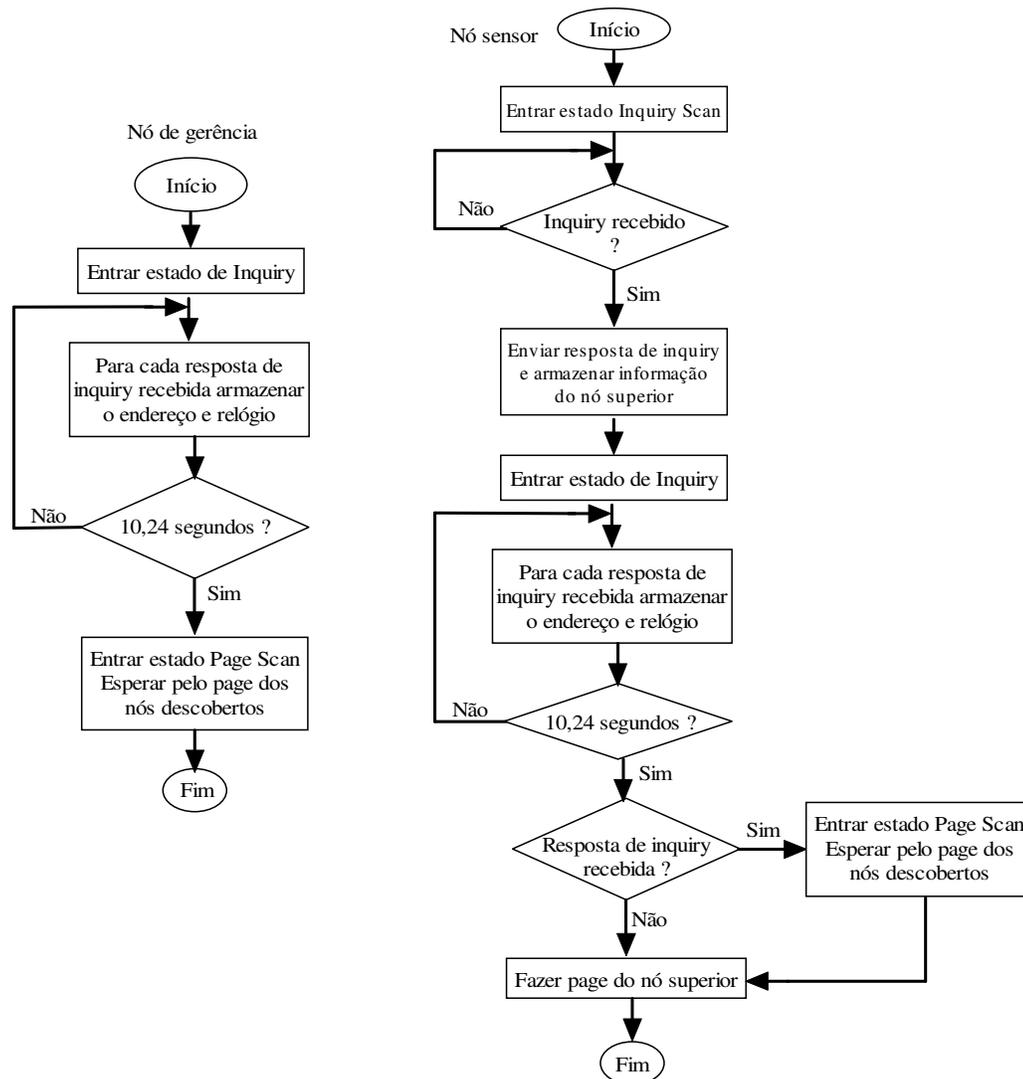


Figura 1. Fluxogramas do processo de descoberta

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Um simulador orientado a eventos foi desenvolvido em C++ para avaliar o desempenho do protocolo. 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 dos nós. 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 o cenário 1 é mostrado na Figura 4 e para o cenário 3 na Figura 5. Depois da fase de descoberta, todos os enlaces são desconectados. Se o nó de gerência quer enviar alguma informação (como opções de configuração) ou coletar dados do nó sensor 8 na 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 ($3 \times 0.64s$) 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 estão 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, uma outra estratégia de transmissão 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 funciona bem quando a densidade dos nós é alta, mas não em outros casos. No exemplo da Figura 6.4, 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.

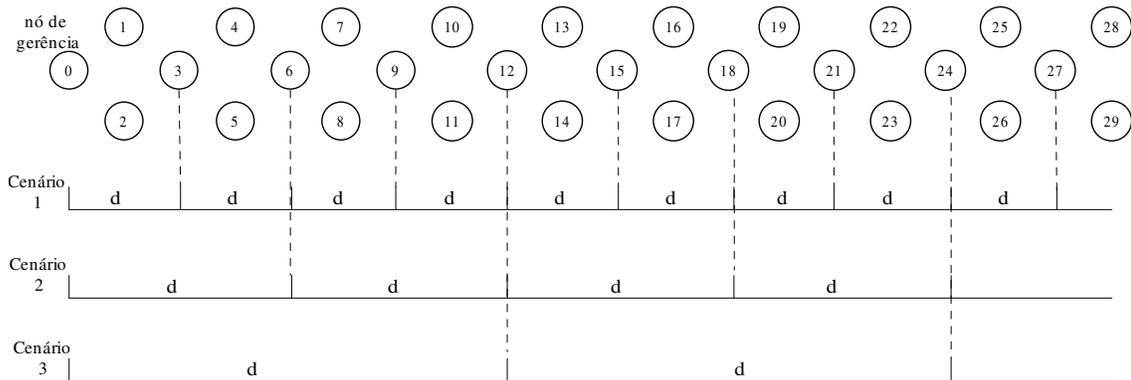


Figura 2. Distribuição dos nós

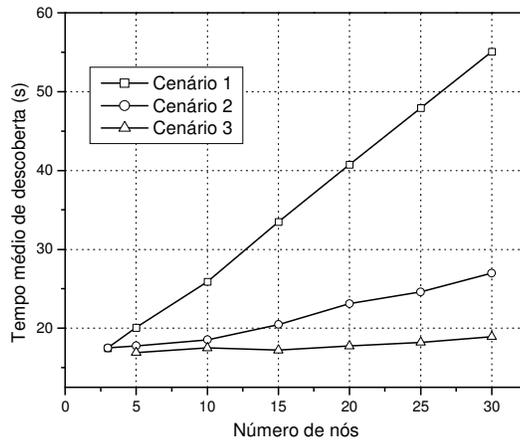


Figura 3. Tempo médio de descoberta

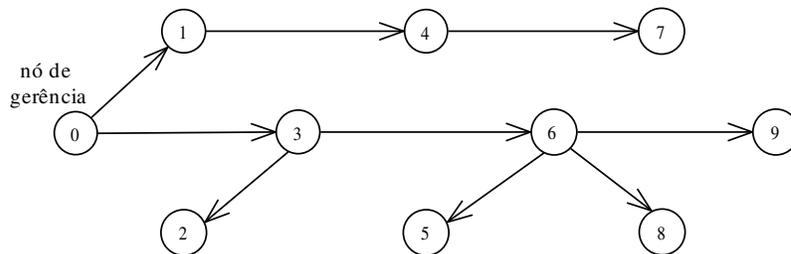


Figura 4. Exemplo de rotas descobertas para o cenário 1 com dez nós

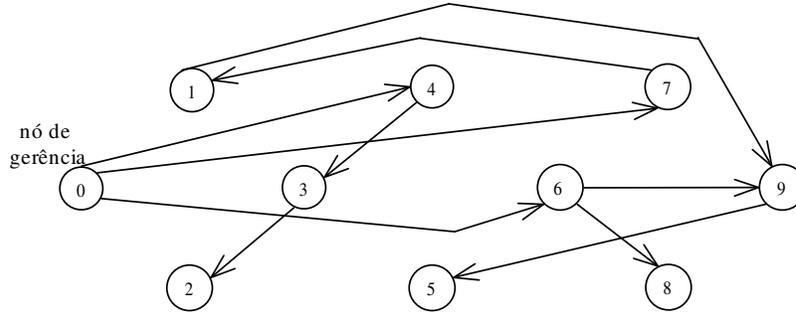


Figura 5. Exemplo de rotas descobertas para o cenário 3 com dez nós

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 lugares abertos, como em florestas, ruas de uma cidade, oceano ou deserto 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.

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. Funciona como um tipo de 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 qualquer hora que o gerenciador queira atualizar as informações sobre os nós. Este processo é diferente da primeira fase. 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 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:

$$T_d = (2 \times page \times num_saltos) + inquiry \quad (1)$$

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). No exemplo da Figura 6, o tempo T_d seria: $T_d = (2 \times 0,64 \times 5) + 10,24 = 16,64$ segundos. Este tempo da segunda fase é independente do número de nós móveis (46 nós móveis na Figura 6). 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:

$$T_s = tempo\ de\ page \times número\ de\ saltos \quad (2)$$

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. Opcionalmente, um usuário pode manualmente colocar seu dispositivo em estado de procura (inquiry scan) se perceber que perdeu a comunicação com a rede.

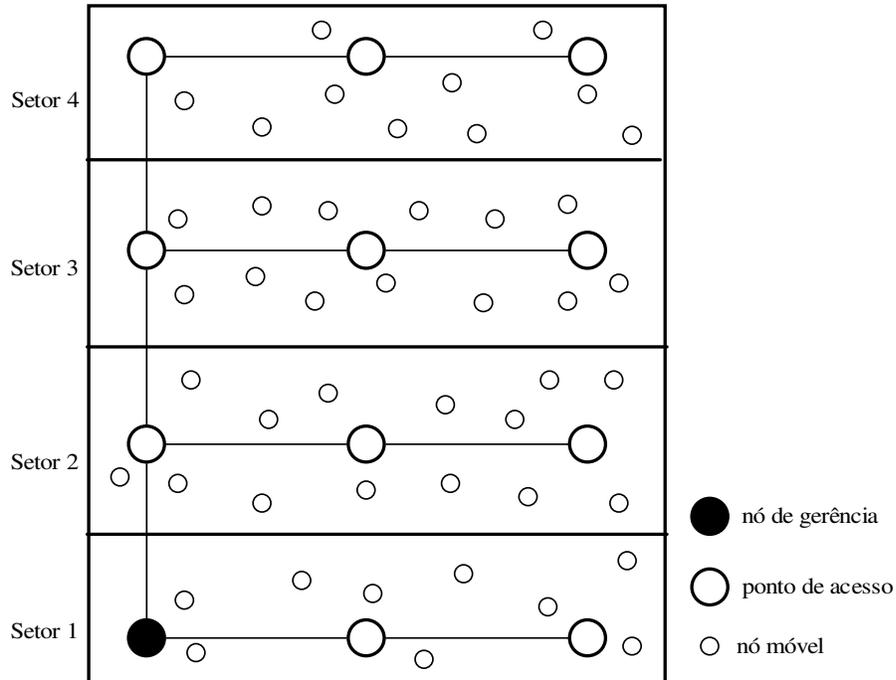


Figura 6. Cenário de aplicação

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi proposto um protocolo para formação e roteamento de redes de sensores usando 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. Este nó possui informação de todos os nós da rede. Quando o nó de gerência quer 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 proposto uma estratégia de transmissão para redes com alta densidade de nós. Como o nó de gerência tem informação de todos os nós, pode fazer o page de um nó considerando o segundo ou terceiro salto na tabela de roteamento. Como estudo de caso, uma aplicação para localizar e monitorar pessoas dentro de edifício foi considerada. 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", 1st 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", 36th 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", 35th 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. Castañó and T. Johnson. Remote system for patient monitoring using Bluetooth. First IEEE International Conference on Sensors, USA, June 2002.