

Aplicação de Tecnologia Adaptativa em Redes de Sensores Sem Fio

(05 Janeiro 2009)

L. Gonda, C. Cagnasca, A. A. de Castro Jr., J. J. Neto

Resumo— Devido ao avanço de diversas tecnologias as Redes de Sensores Sem Fio têm se tornado uma importante tecnologia no monitoramento de diversas aplicações, tais como militar, agricultura, monitoramento de pacientes e outras. Devido à limitação de recursos, essas redes, ao contrário das redes tradicionais, trabalham de maneira colaborativa e os protocolos de comunicação devem se preocupar não só com o transporte de dados, mas também com o consumo de energia na transmissão. Além disso, as RSSF devem possuir a capacidade de auto-organização, através de mecanismos de estabelecimento, prevenção e manutenção da rede, que impõem um mecanismo de funcionamento dinâmico da rede. Este trabalho apresenta uma proposta inicial de aplicação de Tecnologia Adaptativa no desenvolvimento de algoritmos para RSSF.

Palavras chave — *Redes de sensores sem fio, Dispositivos adaptativos, Manutenção de Topologia.*

I. INTRODUÇÃO

UMA Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) é composta por diversos módulos distribuídos, denominados de nós sensores, que possuem capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação [1]. Esta tecnologia foi viabilizada pela evolução de diversas áreas, em especial comunicação sem fio, microprocessadores e dispositivos eletromecânicos, possibilitando que pequenos dispositivos, dispostos em uma área a ser monitorada, pudessem reproduzir, através de sensoriamento, processamento e comunicação com outros nós, fenômenos físicos com mais precisão [2]. Diversas aplicações para RSSF estão surgindo, incluindo medicina, agricultura, controle de ambientes, militar, entre outras [3].

Em geral, os recursos dos nós sensores apresentam limitação em relação à capacidade de processamento, armazenamento, de energia e de alcance do seu rádio de comunicação. Conseqüentemente, os nós sensores devem ser agrupados para executarem tarefas de maneira colaborativa, pois individualmente não são muito eficazes.

Uma das características essenciais em uma RSSF é a capacidade de auto-organização. Dessa forma, ao serem espalhados em grandes quantidades em uma área de monitoramento, os nós sensores devem se organizar automaticamente, para que seja estabelecida a comunicação entre os diversos dispositivos da rede [3]. É importante ressaltar que a auto-organização é necessária, não somente no instante em que a rede está sendo criada, mas também na manutenção da rede, devido a possíveis mudanças em decorrência de falhas e inserção de novos

nós sensores.

Com a finalidade de manter as funções da rede e economizar recursos, especialmente energia, a utilização de mecanismos para manutenção e prevenção a falhas são extremamente importantes em protocolos de comunicação para RSSF. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta inicial da Tecnologia Adaptativa (TA) no desenvolvimento de mecanismos para RSSF.

O restante deste trabalho está organizando conforme descrito a seguir. A Seção II mostra alguns trabalhos relacionados à comunicação e manutenção em RSSF. Na Seção III são apresentadas as definições de grafos dinâmicos e dispositivos adaptativos, bem como características de RSSF que demonstram a necessidade de um dinamismo em suas organização e topologia, o que pode viabilizar a aplicação de Tecnologia Adaptativa. Por fim, na Seção IV são apresentadas as considerações finais do trabalho.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Em uma RSSF, os nós sensores têm como função coletar dados de um ambiente a ser monitorado e enviar essas informações para um nó especial com a função de *gateway*, também denominado de sorvedouro (*sink*), através de um mecanismo múltiplas transmissões/saltos (*multihop*). Em geral este nó possui mais recursos de processamento e memória e é responsável pelo processamento das informações da rede [1].

Na transmissão de dados em uma RSSF, ao contrário do que acontece nas redes tradicionais, como a Internet, por exemplo, além de se preocupar com o envio de informações, os protocolos de comunicação devem levar em consideração também o consumo de energia, já que na maioria das vezes os nós sensores são alimentados por baterias, que possuem carga limitada [2].

Devido à limitação de recursos nos nós sensores, o estudo de mecanismos e protocolos para gerenciamento em RSSF, tais como, manutenção de topologia em RSSF, cobertura da área a ser monitorada e redução de falhas são importantes para prolongar o funcionamento da rede, sem que haja nenhuma intervenção externa, principalmente, em casos em que os nós sensores estão dispostos em locais de difícil acesso. Diversos mecanismos e protocolos foram descritos na literatura, conforme apresentado a seguir.

Sun *et al.* [4] apresentam um mecanismo denominado REMUDA, que tem por objetivo a construção da topologia da rede, envio de informações manutenção de topologia em RSSF. Neste mecanismo, inicialmente o nó

sorvedouro envia uma mensagem de construção de topologia utilizando *broadcast* para a rede, contendo o contador de saltos (*hop count*), cujo valor inicial é zero, e a identificação do nó sensor (*Node ID*). Ao receber uma informação de controle de topologia, cada nó sensor espera um tempo pré-definido por mais mensagens e armazena o remetente de todas as mensagens como vizinhos. Por fim, cada nó seleciona um de seus vizinhos como pai, incrementa seu contador de saltos e envia a mensagem de construção de topologia (*broadcast*). Os critérios para a escolha do nó pai, em ordem de prioridades são: a qualidade do sinal, o contador de saltos (quanto menor o contador de saltos melhor) e o a identificação do nó. Dessa forma, o protocolo cria uma topologia em árvore.

Toda vez que um nó sensor deseja enviar uma informação coletada, este deve encaminhá-la para o nó pai, com a finalidade de que a mesma chegue até o nó sorvedouro.

Para a manutenção da topologia REMUDA, cada nó sensor envia periodicamente informações de controle para seus pais. Se as mensagens de controle não são respondidas satisfatoriamente, de acordo com os parâmetros ajustados para o algoritmo, o nó sensor inicia o processo de escolha do novo pai, enviando *broadcast* para detectar possíveis vizinhos. Em seguida, escolhe, dentre os nós que responderam sua mensagem, um novo nó pai.

Outro mecanismo de disseminação de dados é apresentado por Figueiredo, Nakamura e Loureiro [5]. Este mecanismo é denominado de Multi e corresponde à utilização alternada de dois outros protocolos: SID (*Source-initiated Dissemination*) e EF-Tree (*Earliest First Tree*). O protocolo SID é utilizado em RSSF onde as aplicações são baseadas em eventos e o tráfego na rede é esporádico. Dessa forma, toda vez que um nó sensor precisa enviar informações coletadas em decorrência de algum evento, deve ser criada uma rota deste nó até o nó sorvedouro. Para a construção do caminho, o nó possui informações a serem transmitidas e envia um *broadcast* na rede. Esta mensagem é propagada pela rede até que chegue ao nó sorvedouro e seja determinada uma rota para o envio de dados. O protocolo EF-Tree mantém uma estrutura de comunicação em árvore, que é construída a partir do nó sorvedouro, que envia uma mensagem de *broadcast* para a construção da topologia, que é propagada pelos demais nós da rede. Cada um dos nós sensores da rede selecionam o primeiro nó do qual recebeu a informação de controle como nó pai na árvore de roteamento. Periodicamente, este algoritmo é executado para a manutenção da rede. O algoritmo Multi proposto em [5] utiliza alternadamente os algoritmos SID e EF-Tree, de acordo com o estado da rede. Inicialmente, o algoritmo SID é escolhido para transmissão de dados até o nó sorvedouro. Porém, caso o tráfego de dados na rede se torne muito intenso, de acordo com parâmetros a serem configurados, o algoritmo Multi passa a utilizar o

protocolo EF-Tree.

III. GRAFOS DINÂMICOS – PROPOSTA ADAPTATIVA

A. Dispositivos Adaptativos

Um dispositivo formal é dito adaptativo sempre que o seu comportamento muda dinamicamente, em resposta à estímulos de entrada, sem a interferência de agentes externos, mesmo seus usuários.

Em sua formulação geral, os dispositivos adaptativos são caracterizados através de duas camadas conceituais: o formalismo subjacente e o mecanismo adaptativo [6]. O formalismo subjacente é representado por um dispositivo guiado por regras (formalismo convencional, não-adaptativo) e opera, movendo-se de uma configuração para outra, sucessivamente, em resposta a estímulos recebidos em sua entrada. Tais movimentos são definidos por um conjunto de regras que mapeiam cada possível configuração em uma configuração seguinte correspondente. O mecanismo adaptativo responde pelas mudanças incrementais no comportamento do dispositivo subjacente. As propriedades de auto-modificação são representadas pelas funções e ações adaptativas, capazes de alterar o conjunto de regras do dispositivo subjacente, determinando assim, conseqüentemente, seu comportamento a partir de então.

Para isso, a cada uma de suas regras de formação, podem ser associadas ações adaptativas, que têm a função de tornar o dispositivo auto-modificável. Em outras palavras, as eventuais mudanças no comportamento do dispositivo devem ser conhecidas, em qualquer fase do funcionamento em que sejam efetuadas. Portanto, um dispositivo adaptativo deve ser capaz de detectar todas as situações que possam provocar alterações e reagir adequadamente, impondo as alterações correspondentes ao comportamento do dispositivo. O comportamento desta classe de dispositivos formais baseia-se no funcionamento de um formalismo subjacente (não-adaptativo), descrito por algum conjunto finito de regras de formação. Um dispositivo adaptativo pode ser obtido por ações adaptativas inerentes às regras do formalismo subjacente, de modo a que, sempre que uma regra é aplicada, a ação adaptativa associada a ela é executada, provocando as mudanças correspondentes sobre o conjunto de regras do formalismo subjacente (não-adaptativo).

B. Grafos Dinâmicos

Na maioria das aplicações de algoritmos em grafos, os grafos são dispositivos estáveis que sofrem pouca ou nenhuma mudança. Entretanto, variações que menos estáveis desses dispositivos formais, que possam sofrer alterações em sua estrutura, tais como inserção e remoção de arestas e vértices, vêm sendo alvo de estudos recentes, demonstrando o crescente interesse no desenvolvimento de aplicações que façam uso de formalismos dinâmicos. Nesta seção, definimos os grafos dinâmicos com o objetivo de utilizá-los como ferramentas para a modelagem de soluções

De acordo com a definição de Neto[6], um dispositivo adaptativos que usa um grafo como formalismos subjacente (não-adaptativo) pode ser definido como uma 5-upla:

$$ND = (C, NR, S, c_0, A)$$

Onde:

- ND corresponde ao grafo que modela a RSSF em questão;
- C é o conjunto de possíveis configurações do grafo que modela a RSSF. E $c_0 \in C$ é sua configuração inicial, ou seja, a configuração que é montada inicialmente com base nas regras de conexão da RSSF;
- NR é o conjunto de regras que definem o grafo ND pela relação $ND \subseteq C \times S \times C$. As regras $r \in NR$ tem a forma $r = (c_i, s, c_j)$, indicando que, em resposta a um estímulo de entrada $s \in S$, r altera a configuração corrente de c_i para c_j e “consome” o símbolo s . Neste caso, a mudança de configuração representa uma alteração na topologia da RSSF;
- S é um conjunto (finito) de todos os possíveis eventos válidos e considerados como estímulos de entrada para ND , com $\epsilon \in S$.
- $A \subseteq C$ (resp. $F = C - A$) é dito subconjunto de configuração de aceitação (resp. falha), que corresponde a uma topologia aceita para a RSSF em questão;
- \mathcal{E} denota “vazio”, e representa o elemento NULO do conjunto ao qual pertence;

O mecanismo adaptativo é composto pelas operações que promovem a modificação da topologia da rede. Entre os prováveis fatores que podem influenciar nestas alterações estão a falha de um nó, o desligamento temporário de um nó (economia de energia), a inclusão de novos nós, a mudança de local do nó (a interconexão entre os nós é influenciada pela distância), os ajustes para melhorar o desempenho da rede (nós com pouca energia diminuem sua capacidade de comunicação), entre outros.

IV. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo a ser proposto é composto de duas fases principais: construção da topologia inicial e manutenção da topologia utilizando TA, através de regras adaptativas. Estes mecanismos serão utilizados para reduzir o consumo de energia, aumentando o tempo de vida da rede.

A. Construção da Topologia Inicial

Esta fase do algoritmo é responsável por determinar a topologia inicial da RSSF, de maneira que as informações coletadas pelos nós possam ser encaminhadas ao nó *gateway*. Inicialmente existe um conjunto de vértices que estão isolados (Figura 1(a)). Como o objetivo é fazer com que as informações possam ser enviadas para o *gateway*, este nó é responsável por enviar uma mensagem do tipo

inicio na RSSF. Esta mensagem é responsável por detectar os nós existentes, bem como, determinar quais nós participarão da RSSF inicialmente. Ao receber uma mensagem do tipo *inicio*, cada nó escolhe o nó remetente como pai (cria-se uma aresta entre os dois nós) e encaminha esta mensagem através de *broadcast*. É importante observar que um nó pode receber a mensagem de *inicio* de mais de um nó. Neste caso, o nó apenas cria uma aresta entre o nó emissor e ele mesmo, porém coloca-a como inativa (neste caso a mensagem *inicio* não é enviada para os demais nós). Na Figura 1(b) é apresentada uma possível configuração após a execução do algoritmo de construção de topologia.

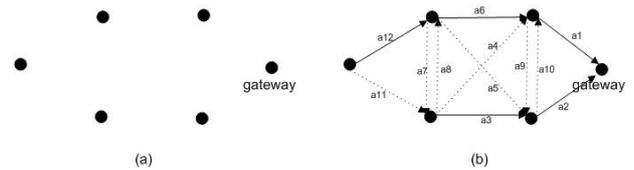


Figura 1. (a) Nós antes da execução da fase de construção de topologia. (b) Uma possível configuração c_0 da RSSF após a execução do algoritmo de construção de topologia.

Na Figura 1(b) as arestas representam que os nós vizinhos possuem algum tipo de conexão, sendo que as arestas pontilhadas indicam conexões inativas e as demais arestas indicam comunicações ativas. É importante observar que o nó *gateway* só possui arestas que chegam e não possuem arestas que saem dele.

Ao final desta etapa é construído um grafo direcionado, cujas regras de funcionamento são adaptativas, possibilitando que arestas sejam adicionadas e retiradas.

B. Manutenção da Topologia da Rede

Apesar dos nós de uma RSSF serem estáticos, mudanças na topologia da rede podem ocorrer durante o tempo de vida da rede. Entre os fatores que podem influenciar estas mudanças, podem ser citados: falha de nós, desligamento temporário de um nó, inclusão de novos nós e mudanças na localização de nós.

Inicialmente pode-se considerar como ND o conjunto de vértices e arestas do grafo apresentado na Figura 1(b). Como serão consideradas apenas falhas de nós, o conjunto S é composto de todas as possíveis falhas de todos os vértices.

Sempre que um nó da rede falha é necessário que regras adaptativas sejam executadas e ações adaptativas sejam tomadas para que a topologia da rede possa ser reconstruída. Para cada um dos vértices da rede, são armazenados, além do pai, os outros vértices adjacentes (arestas pontilhadas na Figura 1(b)), evitando que trocas de mensagens para a escolha de um novo nó pai sejam realizadas quando a falhas de nós sejam detectadas. Além da escolha de novos nós pais, ações adaptativas são necessárias para que a nova topologia da rede seja reestabelecida, ou seja, as regras adaptativas de cada vértice vizinho ao nó que falhou devem ser atualizadas.

Para ilustrar o funcionamento, considere a Figura 2.

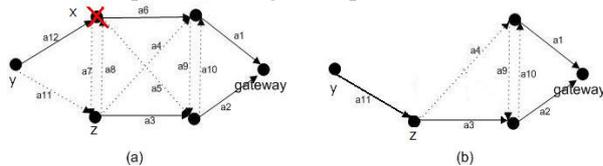


Figura 2. (a) Falha no em um nó da rede. (b) Recuperação da falha do nó x.

Suponha que ocorra uma falha no nó x, Dessa forma, o nó y deve escolher um novo nó pai e o vértice z deve atualizar suas regras.

Para a implementação das regras é possível utilizar uma matriz de adjacências para denotar as relações de vizinhança e paternidade entre os nós e um conjunto de regras associadas à matriz. As regras associadas a essa matriz pertencem a NR.

V. CONCLUSÃO

A tecnologia de RSSF tem se tornado cada vez mais presente e importante em aplicações de monitoramento nas mais diversas áreas. Entretanto, a limitação de recursos, em especial, a energia é um fator que vem se destacando, principalmente, no desenvolvimento de algoritmos de comunicação que permitam uma melhor utilização dos recursos de bateria, sem que haja perdas na comunicação. Além da restrição de energia, um dos fatores que pode influenciar na comunicação em RSSF é o dinamismo da topologia, devido a mecanismos de prevenção e manutenção que são inerentes ao comportamento da rede. Dessa forma, mapear este comportamento dinâmico das RSSF em um dispositivo adaptativo é um desafio extremamente importante do ponto de vista de aplicação da TA, pois pode garantir uma melhor utilização de recursos de energia durante a comunicação. Esta tarefa consiste basicamente em mapear as componentes de uma RSSF nas componentes de um dispositivo adaptativo.

Portanto, a manutenção da topologia pode ser realizada através do mapeamento da mesma em regras adaptativas. Além do controle de topologia, é provável também que problemas de cobertura também possam ser realizados através de tecnologia adaptativa.

REFERÊNCIAS

- [1] I. F. Akyildiz et al. "Wireless Sensor Networks: a survey", *Computer Networks*, 2002, v. 38, n. 4, pp. 393-422.
- [2] D. Cueller, D. Estrin, M. Srivastava. "Overview of Sensor Networks". IEEE Computer Society, 2004, pp. 41-49.
- [3] P. Baronti et al. "Wireless Sensor Networks: a survey on the state of the art and the IEEE 802.15.4 and Zigbee Standards", *Computer Communications*, 2007, v.30, pp. 1655-1695.
- [4] L. Sun, T. Yan, Y. Bi. "REMUDA: A Practical Topology Control and Data Forwarding Mechanism for Wireless Sensor Networks", *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 2006, v. 36, n. 6, pp. 867-874.
- [5] J. J. Neto, "Adaptative rule-driven devices - general formulation and a case study," in CIAA'2001 Sixth International Conference on Implementation and Application of Automata, Pretoria, South Africa, July 2001, pp. 234-250.
- [6] C. M. S. Figueiredo, E. F. Nakamura, A.A.F. Loureiro. "Protocolo Adaptativo Híbrido para Disseminação de Dados em Redes de Sensores Sem Fio Auto Organizáveis", in SBRC'2004 XXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado-RS, Brazil, Maio 2004, pp.



Luciano Gonda é graduado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (1999) e mestre em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (2004). Atualmente, é aluno de doutorado da Escola Politécnica da USP, sob a orientação do Prof. Carlos Eduardo Cugnasca. É membro do Laboratório de Automação Agrícola e do Grupo de Pesquisa em Engenharia e Computação da UCDB e professor-pesquisador da Universidade Católica Dom

Bosco (UCDB). Tem experiência na área de Ciência da Computação, e seus interesses em pesquisa concentram-se em Redes de Sensores Sem Fio, em especial, aplicações agrícolas e controle de ambientes, Algoritmos Paralelos e Distribuídos e Redes de Computadores.



Carlos Eduardo Cugnasca é graduado em Engenharia de Eletricidade (1980), mestre em Engenharia Elétrica (1988) e doutor em Engenharia Elétrica (1993). É livre-docente (2002) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Atualmente, é professor associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e pesquisador do LAA - Laboratório de Automação Agrícola do PCS - Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da EPUSP. Tem experiência na área de Supervisão e Controle de

Processos e Instrumentação, aplicadas a processos agrícolas e Agricultura de Precisão, atuando principalmente nos seguintes temas: instrumentação inteligente, sistemas embarcados em máquinas agrícolas, monitoração e controle de ambientes protegidos, redes de controle baseados nos padrões CAN, ISO11783 e LonWorks, redes de sensores sem fio e computação pervasiva. É editor da Revista Brasileira de Agroinformática (RBIAGro).



Amaury Antônio de Castro Junior é graduado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (1997) e mestre em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (2003). Atualmente, é aluno de doutorado da Escola Politécnica da USP, sob a orientação do Prof. João José Neto. É membro do Laboratório de Linguagens e Técnicas Adaptativas e do Grupo de Pesquisa em Engenharia e Computação da UCDB e professor assistente da

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campus de Coxim (CPCX). Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Teoria da Computação, atuando nos seguintes temas: Tecnologias Adaptativas, Autômatos Adaptativos, Projeto de Linguagens de Programação e Modelos de Computação.



João José Neto é graduado em Engenharia de Eletricidade (1971), mestre em Engenharia Elétrica (1975) e doutor em Engenharia Elétrica (1980). É livre-docente (1993) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente, é professor associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e coordena o LTA - Laboratório de Linguagens e Tecnologia Adaptativa do PCS - Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da EPUSP. Tem experiência na área de

Ciência da Computação, com ênfase nos Fundamentos da Engenharia da Computação, atuando principalmente nos seguintes temas: dispositivos adaptativos, tecnologia adaptativa, autômatos adaptativos, e em suas aplicações à Engenharia de Computação, particularmente em sistemas de tomada de decisão adaptativa, análise e processamento de linguagens naturais, construção de compiladores, robótica, ensino assistido por computador, modelagem de sistemas inteligentes, processos de aprendizagem automática e inferências baseados em tecnologia adaptativa.