SINCRONISMO EM REDES DE SENSORES SEM FIO

Mauro Ferrari Scarpato[1], Paulo Alves Garcia[2]

Abstract *— This article presents and discusses the synchronism techniques in Wireless Sensors Networks - WSN. Initially the need of synchronism in data exchange of these networks and the ways for getting the synchronization state, are described. The kind of networks and the synchronous time distribution architectures are presented. Additionally, some issues found in WSN, like power supply energy limitation, variability of the media, external interferences and coverage area limitation are discussed. Some mentioned problems can result in signal loss and as a result of this, synchronization loss. Some protocols for reaching synchronism in networks are analyzed, such as: Reference Broadcast Synchronization RBS e Timing-Sync Protocol for Sensor Networks TPSN. There are many methods for WSN synchronism guaranty. This article intends to analyze the main techniques used nowadays for this application, comparing them in technical and functional aspects.*

Index Terms — Synchronism, Wireless Sensors Networks, Synchronism techniques.

INTRODUÇÃO

A tecnologia de sensoriamento remoto vem evoluindo significativamente nos últimos anos. Os sensores podem ser utilizados isoladamente ou interligados em redes com fio ou sem fio. Objeto deste trabalho, as Redes de Sensores sem fio - RSSFs são ainda uma tecnologia emergente com um grande potencial de aplicação nas mais diversas áreas, tanto industrial, ambiental e residencial. Contam com uma grande diversidade de interfaces de sensoriamento com funcionalidades para monitorar, instrumentar e possivelmente aliadas a outros equipamentos, controlar diversas variáveis em diversos tipos de processos [1].

As RSSFs consistem de um grande número de dispositivos sem fios (nós sensores ou simplesmente sensores) de interesse para monitoração e controle, trocando informações entre si. Os sensores são alimentados por baterias internas e possuem funções de computação limitada.

As RSSFs podem operar por períodos de tempo, variando de segundos, dias, semanas e até anos, de forma autônoma, podendo ser aplicadas em diversos tipos de meios e situações, tais como: no meio ambiente (para obter informações na agricultura, pecuária, no clima-tempo, etc.), aviação (substituindo as redes com fio, como já são utilizadas hoje em dia), no controle de tráfego (principalmente de vias, estacionamentos, etc.), militar (para funções de monitoração, rastreamento, segurança, controle e manutenção), engenharia em geral (monitoramento e modelagem de estruturas), industrial (para funções de monitoramento, particularmente em áreas de difícil acesso), medicina (para informações de sensoriamento medicinal), segurança (monitoração de itens de segurança em edifícios em geral, residências, centros comercias), etc. [2].

Os meios de comunicação entre sensores e equipamentos de computação e controle, também tem sido objeto de grande evolução. Inicialmente os sensores tinham seus dados transportados por meio de cabos, porém, há um crescimento considerável na comunicação sem fios, através de freqüências específicas de transmissão. Um padrão atual para esse tipo de comunicação é o Bluetooth.

O sincronismo em tempo real é de extrema importância em redes de sensores sem fio. São necessárias referências de tempo precisas entre os sensores componentes da rede, para operações tais como: execução de ações coordenadas, ordenação de *logs*, integração de variáveis, cálculo de velocidades, supressão de mensagens redundantes, recebidas por mais do que um sensor no mesmo instante de tempo, criptografia e descriptografia dos sinais digitais transmitidos e recebidos, etc.

Em certas aplicações é de fundamental importância que a transferência de informações/dados entre os sensores partilhados das RSSF seja feita de forma síncrona, devendo este sincronismo, ser realizado entre os diversos nós sensores da rede ou entre estes e o computador central.

A segurança para transporte dos dados dos sensores também é importante, para evitar que as informações trafegadas na rede, possam ser rastreadas por pessoas indevidas.

SENSORIAMENTO

Sensores são dispositivos que recebem e respondem a sinais ou estímulos. Eles podem ser usados para medir quantidades físicas, como temperatura e pressão, e converter os dados obtidos em sinais eletrônicos.

Nós sensores geralmente possuem bateria, com capacidades e recursos energéticos limitados, sendo bastante difícil ou muitas vezes impraticável um processo de recarga de cada nó da rede. Assim, para se conseguir baixo custo e tamanho reduzido dos nós, em geral os sensores possuem fortes limitações, como restrições de energia, memória e

1 Mauro Ferrari Scarpato, Engenheiro Eletrõnico - Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolação, 930, 01302-907, Consolação, São Paulo, SP, Brazil, mscarpato@ig.com.br
2 Paulo Alves Garcia, Professor e Coordenador de Extensão da Escola de Engenharia - Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolação 930, 01302-907, Consolação, São Paulo, SP, Brazil, paulo.garcia@mackenzie.br

processamento, além de possuírem pequenas antenas. Em função dessas limitações muitas vezes é necessário se reduzir o número de mensagens que trafegam na rede.

Redes de Sensores Sem Fio

Redes sem fios são atualmente muito utilizadas na área da computação e progressivamente têm sido introduzidas na automação e controle. Utilizam-se os dispositivos de computação acoplados a sensores inteligentes, econômicos em energia e de baixo custo, que têm capacidade para coletar informações e dados, interagindo remotamente com o mundo físico.

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) pode ser caracterizada pelo uso de uma quantidade grande de nós - sensores com a capacidade de se comunicar. Esses nós podem ser colocados dentro do fenômeno a ser analisado ou próximo a ele, diferentemente das redes de sensores tradicionais. Em certas aplicações, as posições de cada nó não são pré-determinadas ou pré-calculadas, são aleatórias. A implantação de redes de sensores em locais de difícil acesso pode ocorrer pelo uso de helicópteros, apenas liberando-se os nós sobre a região a ser analisada [3].

O pequeno sensor Smart Dust, por exemplo, mostrado na Figura 1, é um projeto da Universidade de Berkeley onde os sensores possuem uma CPU com processamento de 4MHz, memória RAM de 512 bytes e memória flash de 8kHz, onde só o sistema operacional ocupa 3,5kHz.

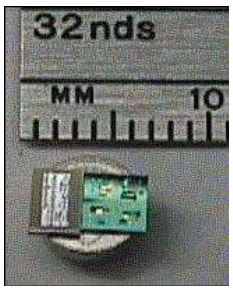

Figura 1 - Nó sensor pertencente ao projeto Smart Dust.

SINCRONISMO

As topologias de redes podem ser dividas em duas categorias quanto à estratégia de sincronização: redes plesiócronas (assíncronas) e redes síncronas.

A palavra plesiócrona vem do grego: PLESÍOS (quase) + KRONOS (tempo). Uma tradução para plesiócrona poderia ser quase síncrona. Ela se refere ao fato do sistema plesiócrono funcionar com todos os subsistemas, quase, mas não perfeitamente sincronizados. Nessas redes são utilizados relógios independentes, extremamente precisos, com desvios de freqüência muito pequenos.

Nas redes síncronas, o sincronismo é estabelecido e mantido através da troca de sinais de controle entre relógios que compõem a rede. As redes síncronas podem ser dividas em duas categorias, quanto a natureza do sinal de controle: tipo mestre-escravo e tipo mutuamente sincronizadas [2].

Nas redes mestre-escravo o processo consumidor (escravo) tem a sua ação totalmente controlada por um processo produtor (mestre), o qual não necessita de autorização para utilizar o escravo. As redes mutuamente sincronizadas proporcionam fase descentralizada e controle de freqüência. Suas exigências quanto à estabilidade dos relógios e a dependência com relação aos nós é menor, e cada nó da rede tem influência equivalente na mesma.

SINCRONISMO EM REDES DE SENSORES SEM FIO

O sincronismo em RSSFs pode ser associado à distribuição de um conjunto de relógios localizados em diversas áreas, conectados por meios de enlaces de rádio, tendo sempre o objetivo de obter-se o sincronismo da rede utilizando-se a capacidade de transferência de dados desses enlaces [2], [4].

Evolução do sincronismo em RSSFs

Nas corridas de automóveis, mais especificamente na Fórmula-1, existem diversos tipos de sensores que necessitam de sincronismo entre o sensor e a equipe de monitoração, em tempo real e com segurança. Um exemplo é a existência de um sensor sem fio nos pneus, que coleta informações sobre como está a pressão (calibração) dos mesmos, ou seja, o sensor pode informar a equipe de monitoração, se o pneu está com algum tipo de vazamento.

Características do sincronismo em RSSFs

Um ponto importante no sincronismo das RSSFs é a tolerância a falhas, visto que, muitas vezes os sensores encontram-se em áreas de difícil acesso ou em áreas perigosas, sendo necessários algoritmos de roteamento e técnicas para auto-organização dos dispositivos. Essa configuração deve ser automática e periódica já que, a configuração manual não é viável devido a problemas de escalabilidade. Assim, auto-organização implica em obterem-se as estruturas organizacionais sem exigir intervenção humana, isto é, os sensores, embora nós individuais, devem ser capazes de cooperar entre si de forma a realizar as operações funcionais que a rede como um todo precisa para funcionar adequadamente [4].

QUESTÕES RELACIONADAS COM O SINCRONISMO EM RSSFS

As redes de sensores sem fio (RSSFs) freqüentemente constituem-se de redes síncronas com topologia mestre-escravo ou mutuamente sincronizadas. Nos itens seguintes discorre-se sobre algumas das principais

técnicas para a obtenção do sincronismo nas redes de sensores sem fio.

Inclusão do processamento na rede de sensores

As redes de sensores sem fio (RSSFs) permitem que o processamento esteja disponível na própria rede de sensores. Com o processamento local, os nós comunicam-se hierarquicamente. Todas as informações do processo estão presentes na rede. Os sensores convertem os dados elementares em informações de alto nível. Tal topologia permite a redução da quantidade de dados envolvidos e de recursos gastos para o envio das informações, além de possibilitar a execução de algoritmos de sincronismo com maior facilidade [2],[3],[5].

Eliminação de redundâncias

Quando em uma RSSF acontece que, dois ou mais sensores detectem um mesmo evento ocorrido, é possível com a utilização de sincronismo, suprimirem-se as redundâncias para que com o registro do tempo, possa-se identificar o evento comum [2],[3],[5].

Problemas com a minimização do gasto de energia

Os nós sensores das RSSF consomem significativa quantidade de energia, mesmo em situação passiva. Os protocolos da camada MAC (*Medium Access Control*), responsáveis pelo gerenciamento da interface de rádio das RSSF, são projetados para que as interfaces de rádio liguem somente quando absolutamente necessárias, ou seja, para trocar curtas mensagens, permanecendo em *stand-by* sempre que possível.

Os erros típicos encontrados nos osciladores de cristal de quartzo são da ordem de 0,001%. Tais erros podem parecer pequenos, mas, em intervalos de tempo longos poderão causar diferenças de tempo expressivas [2], [3],[5].

Integração de dados nos multi-sensores

Sensoriamento distribuído é uma técnica em que são utilizados vários sensores próximos ao processo a ser medido. As informações detectadas isoladamente por cada sensor não são significativas, porém, a combinação das informações obtidas pelos diversos sensores permite uma visão mais completa e abrangente do processo. Em certos casos, certas variáveis do processo não são detectáveis por um sensor individual.

Neste caso é necessária a utilização de sincronismo para que as variações nos atrasos de transmissão cada sensor (*jitter*) não comprometam a validade das medições. Uma solução possível para este problema é a utilização de *timestamps* (carimbos de tempo). Não seria necessária a utilização de sincronismo, para os casos de fenômenos estacionários ou atrasos na transmissão (*jitter*) insignificantes [2],[3],[5].

Network Time Protocol - NTP

Nas redes utilizadas em sistemas de maior complexidade, como por exemplo, nas redes de computadores, utiliza-se, freqüentemente, o protocolo NTP (*Network Time Protocol*). Tal protocolo permite a sincronização de relógios de servidores e roteadores na Internet, mediante a solicitação de um cliente periodicamente a um servidor. Através da análise de possíveis desvios, o protocolo especifica o atraso induzido na comunicação. Através do NTP podem-se obter precisões de centésimos de segundos nas redes WAN (*Wide Area Network*) e décimos de milisegundos em redes locais LAN (*Local Area Networks*).

PRINCIPAIS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA A OBTENÇÃO DO SINCRONISMO NAS RSSFS

As principais técnicas para o sincronismo das RSSFs são descritas a seguir:

Reference Broadcast Synchronization - RBS

É uma técnica em que cada nó periodicamente gera mensagens (*broadcasts*), denominadas *beacons* para os nós vizinhos e os nós receptores usam o instante de chegada dessas mensagens como tempos de referência. Sendo assim, os nós adjacentes compartilham os carimbos de tempo (*timestamps*). São utilizadas então, técnicas de sincronismo de redes mutuamente sincronizadas. Existem algoritmos que operam em estruturas onde há múltiplos níveis (*multi-hop*), ou seja, os nós não se comunicam diretamente com todos os nós, havendo atrasos devidos às múltiplas conexões em cascata. Tais algoritmos, usualmente são complexos e tratam os diversos instantes de chegada dos *beacons*, sendo feitas análises estatísticas para encontrar-se um valor ideal dentre os obtidos nos diversos nós.

Este protocolo utiliza uma seqüência de sincronização de mensagens de um transmissor a fim de estimar o *offset* (erro) e *skew* (fenômeno em circuitos síncronos, em que o sinal de relógio chega através de componentes distintas em momentos diferentes e com atrasos diferentes) referentes aos relógios locais de cada um, favorecendo um alto grau de exatidão no sincronismo das redes de sensores.

A exatidão do sincronismo e a precisão obtida dependem do número de *beacons* transmitidos. A limitação desse sistema é o possível aumento do overhead das comunicações, em caso de troca de mensagens muito freqüente entre nós vizinhos [3], [2], [5].

Timing-Sync Protocol for Sensor Networks - TPSN

Utilizando-se uma topologia hierárquica na rede, o sincronismo é realizado a cada par de nós. Um nó é eleito como mestre para efeito de sincronismo. Cada nó é sincronizado através da troca de duas mensagens com o nó de referência, que está um nível acima na hierarquia [6]. O carimbo de tempo (*timestamp*) é armazenado na camada MAC (*Medium Access Control*), que representa o endereço físico da unidade de rádio, para minimizarem-se problemas de conexão e de topologia. Havendo falha de um nó ou mudança na topologia, a estrutura e a designação do mestre podem ser refeita. Como limitação, pode-se detectar que, a técnica TPSN não permite tratar eventuais variações dos relógios dos nós. Dessa forma, perde-se em precisão e esta solução, não possibilita também, topologias dinâmicas [3].

Técnica de sincronismo POST-FACTO

Nessa técnica, os nós sensores estão normalmente fora de sincronismo. Ocorrendo o recebimento de uma mensagem, cada nó armazena o instante de chegada desse pacote, referenciado ao seu próprio relógio. Ao mesmo tempo, outro nó que age como mestre dispara um sinal de sincronismo para todos os nós contidos nessa área. Os nós que recebem esse sinal sincronizam os seus relógios referenciados ao nó mestre que tem uma limitação ao seu alcance. Outro aspecto limitante é a ocorrência de somente determinados instantes de sincronismo. Tal fato torna essa técnica não adequada para distâncias grandes ou quando há a necessidade do sincronismo por intervalos de tempo maiores [2], [3], [5].

ESTUDO DE CASO

Foram analisadas simulações com o micro sensor MICA2Dot da empresa Crossbow, a fim de mostrar as diferenças entre as duas técnicas de sincronismo em RSSFs: *Reference Broadcast Synchronization* (RBS) e *Timing-sync Protocol for Sensor Networks* (TPSN).

Há um problema comum entre os protocolos previamente apresentados, pois, foram desenvolvidos para ter energia eficiente, preciso, robusto, e assim por diante, mas nenhum deles foi desenvolvido com muita segurança (contra os ataques), como em toda a segurança dos protocolos do computador está sempre uma edição e os ataques em protocolos são inevitáveis.

Em ambos os algoritmos, a correção em pulsos de disparo de nó do sensor é feita com base em duas trocas da mensagem entre nós. Um sensor transmissor pode dinamicamente comutar entre RBS e TPSN simplesmente comparando o número de receptores conectados em termos da relação recepção / transmissão. Vinte simulações foram realizadas (no software MATLAB ®) sobre uma área de 1000m x 1000m que é povoada aleatoriamente com 500 sensores. Em cada simulação, conforme mostra a Figura 2 e a Figura 3, o valor de ponto inicial do receptor é somado de uma unidade, ao número maior de receptores conectados a um sensor. A sincronização é executada para cada um dos valores de ponto inicial do receptor e o consumo de energia é armazenado e comparado ao consumo de TPSN e de RBS.

Cada um dos pontos de dados é traçado, junto com uma linha que representa a média de todas as simulações.
Para a plataforma analisada com o micro sensor MICA2Dot, a recepção usa aproximadamente 24 mW de potência, enquanto que a transmissão exige 75 mW e -5 dBm [7].

Uso eficaz da energia

As simulações demonstram a redução no consumo de potência para diversos tamanhos de rede. O número de sensores é mudado de 250 até 1500, em incrementos de 250. A plataforma do MICA2Dot é utilizada, e os resultados de consumo, são apresentados na Tabela 1.

Os resultados apresentados na Tabela 1 mostram que o consumo de energia da técnica RBS é mais dependente da densidade dos sensores em uma determinada área. Ao contrário, a técnica TPSN é menos afetada pelo tamanho da rede. Quando o tamanho da rede aumenta de 250 sensores para 500 sensores (para a mesma área de 1 km quadrados), a técnica RBS torna-se menos eficiente que a técnica TPSN e quanto mais sensores são introduzidos na rede, RBS torna-se menos indicada para utilização em uma RSSFs.

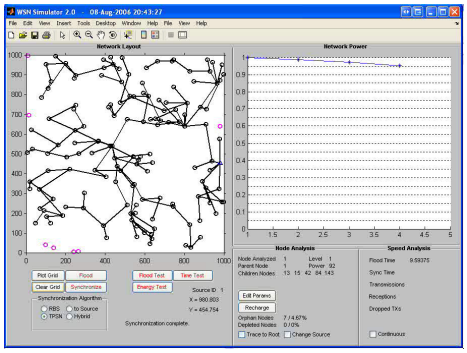

Figura 2. Simulação do protocolo de sincronismo TPSN

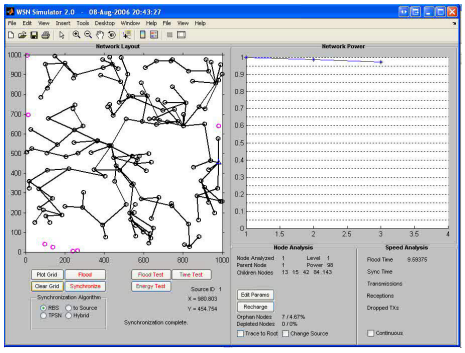

Figura 3. Simulação do protocolo de sincronismo RBS

Tabela 1
Média de consumo de energia em mW para diversos tamanhos de rede.

Qtd. de Sensores	250	500	750	1000	1250	1500
RBS	446	1046	1844	2762	3756	5060
TPSN	511	983	1434	1885	2331	2770
Econo-mia sobre RBS	9,.29%	20,8%	32 %	39,4%	44,2%	50,3%
Econo-mia sobre TPSN	20,8%	15,7%	12,7%	11,2%	10,1%	9,2%

Precisão e erros no sincronismo

Estes protocolos foram projetados com desempenho e não levaram em consideração a segurança, pois a incerteza no remetente contribui um erro de sincronização em torno de 0.62 ms, onde este número é muito pequeno em comparação ao valor absoluto do erro de sincronização total. A autenticação, a redundância, e a recusa na transmissão da informação corrompida de sincronismo são medidas defensivas possíveis.

Nos algoritmos de sincronização, RBS e TPSN, ambos constataram grandes precisões, na ordem de alguns microssegundos. Embora as duas técnicas usem aproximações completamente diferentes, a comparação mostrou que, a média na taxa de erros (foi caracterizada a exatidão do algoritmo medindo o erro de sincronização) com a técnica TPSN era menor que com a RBS, conforme constata a Tabela 2.

Tabela 2
Taxa de erros em microssegundos na sincronização

	TPSN	RBS
Média de erro em µs	16,9	29,1
Pior caso de erro em µs	44	93
Melhor caso de erro em µs	0	0
% tempo de erro < média	64	53

CONCLUSÃO

Este estudo permitiu evidenciar que as Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs), embora possuam algumas limitações, tais como a mobilidade, baixa autonomia e baixa disponibilidade de energia nas suas fontes de alimentação elétricas, permitem a sua utilização em inúmeras aplicações, nas mais diversas áreas e processos. Dessa forma, as RSSFs têm apresentado potencial econômico crescente, otimizado os sistemas de monitoração e controle nos processos industriais, além de possibilitarem diversas aplicações, envolvendo aspectos ambientais, urbanos e na saúde.

Foram analisadas três principais técnicas para a obtenção do sincronismo nas RSSFs: RBS (*Reference Broadcast Synchronization*), TPSN (*Timing-sync Protocol for Sensor Networks*), e POST-FACTO.

A técnica RBS, apesar de simples implementação, causa um aumento do *overhead* quando há a troca de mensagens muito freqüente entre nós adjacentes. A técnica TPSN armazena o carimbo de tempo (*timestamp*) na camada MAC da interface de rádio. Em caso de falha de um nó ou mudança na topologia, a estrutura e a designação do mestre pode facilmente ser refeita, pois a informação necessária para isso estava memorizada. Tal fato, torna o desempenho desse método, superior em relação à técnica RBS. A técnica TPSN é indicada para redes *multi-hop* com um número restrito de nós. Por fim, observou-se que a técnica POST-FACTO não é aplicável para distâncias grandes ou em caso de haver a necessidade do sincronismo por grandes intervalos de tempo. Percebe-se que, a técnica POST-FACTO, pode ser aplicada a sistemas onde há a necessidade da comparação do instante relativo de chegada de um determinado sinal a um conjunto de sensores distribuídos em uma determinada região, por exemplo. No capítulo 7 deste trabalho, foi analisada uma simulação onde a economia de energia varia de acordo com a densidade dos sensores, assim como com a relação da recepção com a transmissão do uso da energia. Tal análise aponta para o fato de, as redes com alto grau de saturação de sensores, por exemplo, 1500 sensores em uma área de 1 km quadrado e com alta taxa de erros de sincronização favorecem o uso da técnica TPSN em relação à técnica RBS. Portanto conclui-se que os algoritmos TPSN são escaláveis e podem ser estendidos às redes de grande escala.

REFERENCES

[1] CRUZ, Arlindo. O que são Redes sem Fio? Disponível em: http://suplementoti.blogspot.com/ 2007/09/o-que-sao-redes-sem-fios.html. Acessado em 12.04.2008.

[2] GARCIA, P. A. O Sincronismo nas Redes de Sensores sem Fio. In: 6. Congresso Internacional de Automação, Sistema e Instrumentação, 2006, São Paulo - SP.

[3] ROMER, R.. Time Synchronization and Localization in Sensor Networks. A dissertação foi realizada em Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH), 2005.

[4] GARCIA, P. A.. Redes de Malhas de Sincronismo de Fase – Uma Análise via teoria dos Sistemas Dinâmicos. Dissertação de Mestrado. Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2000.

[5] ELSON, J.; GIROD, L.; ESTRIN, D.. Fine-Grained Networks Time Synchronization using Reference Broadcasts. Proc. Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 2002), Vol 36, pp. 147–163, 2002.

[6] GANERIWAL, S.; KUMAR, R.; SRIVASTAVA, M. B.. Timing-sync Protocol for Sensor Networks Networked and Embedded Systems Lab, University of California, Los Angeles 56-125B Eng. IV, UCLA EE Dept., Los Angeles CA, 2003.

[7] CROSSBOW MICA2Dot WIRELESS MICROSENSOR MOTE, Document Part Number 6020-0043-05 Rev A. Disponível em: http://www.xbow.com/Products/Product _pdf_files/Wireless_pdf/MICA2DOT_Datasheet.pdf. Acessado em 30.05.2008.