

CHDOS: Um Novo Algoritmo de Roteamento para Redes de Sensores

Eduardo Habib B. Maia¹, Antonio Alfredo F. Loureiro¹, Daniel Câmara²

¹Departamento de Ciência da Computação- Universidade Federal de Minas Gerais
Caixa Postal 702 - 30123-970 - Belo Horizonte – MG- Brasil

²Department of Computer Science - University of Maryland
A. V. Williams Building - College Park, Maryland, 20742, USA
{habib,loureiro}@dcc.ufmg.br, danielc@cs.umd.edu

Abstract : *This paper presents a routing algorithm for sensor networks based on LEACH [1] and PEGASIS [2] . The proposed algorithm, when compared with LEACH presents not only a higher network lifetime but also higher number of messages sent.*

Resumo : *Este artigo apresenta um novo algoritmo de roteamento para redes de sensores sem fio baseado em dois dos mais referenciados algoritmos de roteamento para redes de sensores sem fio, o LEACH [1] e o PEGASIS [2]. Os resultados de simulações onde comparamos o novo algoritmo com o LEACH nos mostra um extraordinário ganho com relação ao número de pacotes transmitidos na rede e com relação ao início do degradamento da rede.*

1. Introdução

Este trabalho irá apresentar um novo algoritmo de roteamento para redes de sensores sem fio, o CHDOS. Este algoritmo é baseado em dois outros algoritmos de roteamento para redes de sensores sem fio (RSSF) chamados LEACH [1] e PEGASIS [2]. Redes de sensores sem fio são redes em que os elementos computacionais são responsáveis por algum tipo de sensoriamento e estão interligados através de meios não guiados. Existe uma grande variação nas características básicas destas redes como, por exemplo, número, capacidade e autonomia dos elementos interligados. Diferentemente de outros tipos de redes, as RSSF estão focadas principalmente nas características dos dados para os quais foram projetadas para monitorar [4]. RSSF normalmente possuem características particulares como o número de nodos ser várias ordens de grandeza maior que o de uma rede *Ad Hoc*, redes densamente povoadas, a topologia mudar frequentemente e as redes serem em sua maioria baseadas em *broadcast* [5].

A característica dos dados coletada tem um papel central na modelagem da rede. Por exemplo, uma rede projetada para monitorar a umidade em uma floresta

tropical tem características radicalmente diferentes a outra rede montada no mesmo ambiente para detectar, por exemplo, focos de incêndio. Nas primeiras a coleta de dados é um processo constante. Neste tipo de rede pode-se prever, ou mesmo programar, a coleta de dados para evitar problemas como colisão de pacotes e tráfego em rajadas. A principal preocupação, depois é claro da coleta e transmissão das informações coletadas, é provavelmente manter a rede funcionando o maior tempo possível. No segundo tipo de RSSF o evento observado, se e quando ocorrer, não será programado e possivelmente vai ser detectado por mais de um sensor ao mesmo tempo. Nestas redes a informação tem que ser transmitida o mais rápido possível, uma vez que a informação é urgente e o sensor que a detectou pode ser destruído em pouco tempo pela própria fonte da informação. Neste caso não se tem uma preocupação exacerbada com a longevidade da rede, uma vez que o evento para o qual ela foi criada efetivamente ocorreu. Dadas as características destas redes é difícil contornar problemas como tráfego em rajadas ou mesmo colisões. Com isto queremos mostrar que duas redes, montadas em ambientes similares, e possivelmente com equipamentos similares podem ter comportamentos completamente diferentes.

Os projetos e arquiteturas de RSSF sofrem um profundo impacto das aplicações de sensoriamento. Desta forma é difícil dizer que um algoritmo é melhor ou pior que o outro, o que se pode afirmar é que dada as características da aplicação alguns algoritmos podem se adequar melhor a elas que outros.

Este artigo está dividido da seguinte forma, seção 2, trabalhos relacionados, apresenta o modo de funcionamento de dois dos mais importantes algoritmos de roteamento para RSSF o LEACH [1] e o PEGASIS [2]. A seção 3 apresenta o modo de funcionamento do CHDOS. A seção 4 apresenta uma comparação entre o algoritmo aqui proposto e o LEACH e a seção 5 apresenta as conclusões deste trabalho.

2. Trabalhos relacionados

Esta seção apresenta dois dos mais importantes algoritmos de roteamento para redes de sensores sem fio. Ambos os algoritmos serviram de base para a confecção do CHDOS.

2.1. LEACH – Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy

O LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) proposto por Heinzelman et. al. [1], é um algoritmo de roteamento hierárquico, auto-organizável e adaptativo.

No LEACH, os nodos se organizam em *clusters* com um nodo agindo como líder do grupo. Os nodos participantes do grupo enviam seus dados para o líder que se encarrega de enviar todos os dados do *cluster* diretamente para um nodo monitor, ou *sink*. Este nodo *sink* é o destino final de todas as informações geradas pela rede de sensores. Os nodos líderes têm um gasto de energia consideravelmente maior que os nodos normais, pois é ele que envia os dados do grupo a estação base (que geralmente está longe). Caso o nodo líder fosse escolhido de forma fixa, como ocorre em redes hierárquicas tradicionais, o tempo de vida destes nodos seria bem menor que o dos outros nodos da rede. Por este motivo o LEACH faz um rodízio aleatório de líderes a fim de não acabar com a energia de um único nodo. Esta técnica evita o surgimento de áreas descobertas na rede de sensores. O LEACH faz também a fusão de dados similares visando diminuir o número de dados enviados à estação base visto que o custo de transmitir um bit é bem maior do que o custo de processamento.

Durante o processo de criação de *clusters*, um sensor se elege como líder de um grupo local com uma certa probabilidade. Estes líderes enviam uma mensagem para todos os outros sensores da rede informando que eles são os possíveis líderes. Cada nodo decide então qual o líder ele deseja seguir escolhendo pertencer àquele grupo em que será gasto a menor quantidade possível de energia na comunicação com o líder [1].

Depois que todos os nodos já estão organizados em grupos, cada líder cria uma agenda para cada nodo em seu grupo. Esta agenda tem duas motivações, a primeira é que permite que os nodos desliguem suas interfaces de rede e somente religuem pouco antes do momento que devem se comunicar com o seu líder. A segunda motivação é a tentativa de diminuir colisões de mensagens no meio não guiado. Quando todos os dados são recebidos pelo líder, este os agrega, comprime e envia a estação base. Esta compressão de dados, bem como a eliminação de dados repetidos, é importante, pois apesar de apresentarem um custo em termos de energia, a transmissão é consideravelmente mais cara do que o processamento dos dados.

2.2. Detalhes do LEACH

A operação do LEACH é dividida em *rounds* onde cada *round* começa com uma fase de inicialização, quando os grupos são organizados, seguido por uma fase constante, quando a transferência de dados para a estação base ocorre. Para minimizar os custos, a fase constante é mais longa se comparada com a fase de inicialização.

Um número predeterminado de nodos p , elege-se como possível líder. A decisão de se tornar um líder é feita escolhendo-se um número aleatório entre 0 e 1. Se o número gerado for menor do que um limite $T(n)$ então o nodo se tornará um líder no nodo corrente. O limite $T(n)$ é dado pela expressão:

$$T(n) = P / (1 - P * (r \bmod (1/P))) \text{ se } n \text{ pertence a } G$$

$$T(n) = 0 \text{ caso contrário,}$$

onde P é a porcentagem desejada de líderes, r é o *round* corrente e G é o conjunto de nodos que não foram líderes nos últimos $1/P$ *rounds*. Os nodos que são líderes no *round* 0, não podem ser líderes novamente nos próximos $1/P$ *rounds*. A probabilidade de um nodo que ainda não foi líder se tornar líder de grupo vai aumentando desde que existem menos nodos que podem ser elegíveis.

Após o nodo se eleger um líder para o *round* corrente ele faz um broadcast com uma mensagem informando este fato. Para isso ele utiliza um protocolo MAC CSMA e todos os líderes transmitem esta informação gastando a mesma energia. Os nodos que não são líderes ligam seus receptores durante esta fase para escutar todas as mensagens. Após isso cada nodo que não é um líder decide a qual grupo ele pertence neste *round*. Esta decisão é baseada no quão forte é o sinal recebido. Eles escolhem pertencer ao grupo cujo líder enviou uma mensagem com o sinal mais forte. Isso é feito porque é provavelmente este líder que se encontra mais perto e, portanto será o que exigirá o menor gasto de energia para a comunicação.

Depois que cada nodo decidiu a qual grupo ele pertence, ele precisa informar ao líder que ele será um

membro do grupo. Cada nodo transmite esta informação ao líder usando o protocolo MAC CSMA. Durante esta fase todos os líderes têm que deixar os seus receptores ligados.

O líder de grupo recebe todas as mensagens dos nodos que gostariam de pertencer ao seu grupo. Baseado no número de nodos no grupo o líder cria uma agenda TDMA informando a cada nodo quando ele pode transmitir. Esta agenda é transmitida de volta aos nodos do grupo.

Assim que os grupos são criados e a agenda transmitida, a transmissão dos dados pode começar. Assumindo que os nodos sempre possuem dados a enviar eles o enviam ao líder durante o tempo alocado a ele para fazer esta transmissão. Esta transmissão procura gastar o mínimo possível de energia (ele já sabe a distância aproximada do líder baseado na potência do sinal do cluster durante a fase de inicialização). O rádio de todos os não líderes são desligados até chegar a hora determinada para que este nodo transmita algo minimizando a dissipação de energia nestes nodos. O líder tem que ficar com seu rádio ligado para receber todos os dados dos nodos no grupo. Quando todos os dados de todos os nodos do grupo são recebidos, o líder os transmite à estação base [3].

A fase descrita acima é a fase constante citada anteriormente. Após um certo tempo, que é determinado a priori, o próximo *round* começa com cada nodo determinando se ele pode ser um líder e repassando esta informação como explicado anteriormente.

2.3. PEGASIS – Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems

O PEGASIS é um protocolo para RSSF plana proposto por Lindsey e Raghavendra [2], baseado no conceito de correntes. Cada nodo troca informações apenas com os vizinhos mais próximos formando uma *corrente* entre os nodos.

Para a coleta das informações, o protocolo usa o conceito de *rounds*. A cada *round* os dados de todos os nodos são coletados e reunidos em um único pacote e um nodo, chamado de líder, é selecionado para transmiti-lo a estação rádio base.

Para que os dados sejam recolhidos em cada *round*, cada nodo recebe os dados de todos os seus vizinhos faz a fusão com seus próprios dados e transmite na direção do líder na corrente.

No primeiro *round* a corrente entre os nodos é formada. O algoritmo para a formação da corrente inicia pelo nodo mais afastado da estação rádio base, que localiza seu vizinho mais próximo e o adiciona à corrente. Os nodos vão sendo adicionados até que todos os nodos

façam parte da corrente. Se ocorrer a “morte” de algum nodo, a corrente deverá ser reconstruída.

Nos *rounds* seguintes ocorre a fusão e transferência dos dados para a estação base. A cada *round*, cada nodo recebe um pacote contendo as informações coletadas por seu vizinho. Ele faz uma fusão das informações recebidas com as suas informações, e envia ao outro vizinho. As informações são reunidas e transferidas através da corrente, até que elas cheguem ao nodo líder. O nodo líder então envia os dados coletados na rede para a estação base.

A seleção do nodo líder é feita da seguinte forma:

- Seja N o número total de nodos na rede;
- Seja i o número do *round*;

O nodo líder será o nodo de número “ $i \bmod N$ ”. Logo, o líder estará em uma posição randômica em cada *round*. Isto é importante para prover robustez à rede, pois os nodos morrerão em posições aleatórias.

É usado um sistema de *passagem de token* para que a transferência das informações seja iniciada nas extremidades da corrente. O líder envia um *token*, através da corrente, para os nodos situados nas extremidades. Os nodos vão passando o *token* juntamente com os dados até alcançar o líder. Na Figura 1 o nodo líder passa o *token* para o nodo A. Ao receber o *token*, o nodo A envia seus dados para o líder através de B, juntamente com o *token*. Quando o líder recebe os dados de B, ele repassa o *token* ao nodo D que procede da mesma forma passando os dados para o líder através de C. A utilização do sistema de

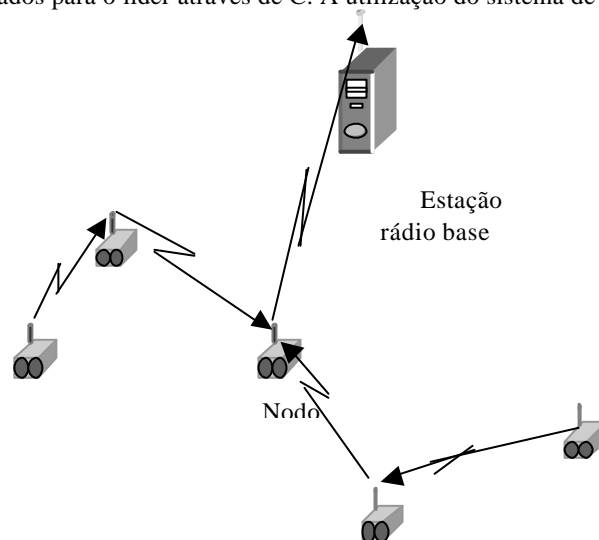


Figura 1 - Passagem do token no PEGASIS

passagem de *token* não acrescenta um custo alto ao protocolo, visto que o tamanho do *token* é pequeno.

O PEGASIS faz com que cada nodo receba e transmita apenas um pacote de dados por *round* e seja

designado como líder a cada N rounds. Espera-se com isto, garantir maior tempo de vida para toda a rede.

A principal vantagem do PEGASIS é que ele reduz o gasto de energia dos nodos ao evitar que vários líderes se comuniquem com a estação base (que geralmente está a uma longa distância). Espera-se com isto, garantir maior tempo de vida para toda a rede.

2.3.1. Considerações

Os dois algoritmos aqui apresentados têm características próprias e que podem ser interessantes para algumas aplicações e não para outras. Contudo, de forma geral, os sensores que implementam ambos algoritmos devem ter uma potência suficiente para transmitir dados diretamente para a estação rádio base. Isto limita o tamanho da rede e pode encarecer os sensores.

Com relação a características particulares dos dois algoritmos podemos dizer que os sensores no PEGASIS apresentam um tempo de vida maior, mas em compensação a latência na transmissão dos dados é maior que a do LEACH. A formação da corrente no PEGASIS acaba com o problema de colisão que o LEACH apresenta, pois os nodos transmitem ordenadamente e apenas quando recebem o *token*.

2.4. CHDOS – Cluster Head with Deny Of Service

O algoritmo CHDOS (*Cluster Head with Deny Of Service*) é baseado tanto no LEACH quanto no PEGASIS, tentando minimizar problemas que ocorrem em ambos algoritmos. O CHDOS é um algoritmo hierárquico e que envia um *token* para organizar o envio de dados dos nodos da rede de sensores. Ele organiza a rede em *clusters* da mesma forma que o LEACH. A cada novo *round* um novo grupo de líderes é eleito aleatoriamente para encaminhar os dados à estação rádio base. Contudo os nodos podem se negar a retransmitir pacotes de dados caso seu nível de energia esteja baixo.

A cada *round* os nodos se associam a um líder e repassam a este as informações que devem ser enviadas a estação rádio base. Esta eleição de líderes é feita exatamente da mesma forma que o LEACH. Entretanto, todos os líderes, ao enviar um broadcast informando que eles se elegeram líder, enviam também a sua posição (x e y) que é armazenada também pelos líderes dos *clusters* próximos. Os nodos líderes formam, então, uma corrente. Nesta corrente o líder mais próximo da estação base envia um *token* para o nodo líder que se encontra a uma menor distância na direção contrária à estação base. Cada nodo que recebe o *token* faz o mesmo até que o fim da rede seja alcançado. Quando o ultimo líder da corrente é alcançado, ele retorna o *token* ao nodo anterior enviando também o pacote com os dados do seu grupo. O pacote de dados é repassado ao nodo anterior da corrente que também

agrega os dados de seu grupo e retransmite o pacote. O processo se repete até que os dados cheguem à estação base. Caso existam *clusters* não cobertos a estação rádio base repassa o *token*, para um líder próximo diferente do anterior e o processo é repetido até que todos os nodos líderes da rede tenham recebido o *token*.

Os dados dos nodos do *cluster* são transmitidos a estação rádio base através do nodo que enviou o *token*. Se a energia do nodo que enviou o *token* estiver abaixo de um limite aceitável, o nodo líder avisa aos próximos nodos da corrente que eles devem transmitir diretamente direto para a estação rádio base. Desta forma os nodos podem se recusar a servir de ponte para a comunicação de outros nodos. O valor escolhido para limite aceitável de energia foi $\frac{1}{4}$ da energia inicial dos nodos. Este valor foi escolhido empiricamente. Nas simulações realizadas a partir deste limiar a rede começa a apresentar áreas descobertas. Na próxima eleição de líderes, quando a corrente for formada novamente, esta restrição pode não ser mais válida. Tudo vai depender dos novos nodos líderes.

Um dos pontos principais do LEACH é a tentativa de evitar que os nodos mais próximos à estação rádio base morram devido ao grande volume de dados retransmitidos. No LEACH os nodos líderes enviam os dados diretamente a estação rádio base, o CHDOS por sua vez tenta evitar a morte prematura dos nodos mais próximos da estação rádio base de outra forma. No CHDOS os nodos, quando não têm mais reservas de energia para servirem de ponte param de oferecer este serviço e passam a transmitir somente os dados do seu *cluster* a estação rádio base.

O CHDOS, mesmo utilizando a mesma técnica de formação de correntes do PEGASIS, a implementa de forma diferente tentando minimizar o problema da latência da transição dos dados. No PEGASIS os nodos líderes são escolhidos aleatoriamente para transmitir os dados a estação rádio base. Desta forma, pode ser que este nodo esteja relativamente distante e o seu custo de transmissão seja alto. Outro fato que ocorre no PEGASIS é que o nodo líder transmite os dados da rede toda e este volume de informações pode ser grande drenando a energia do nodo líder.

3. Experimentos

A simulação foi feita em dois computadores Pentium 4 , 1.6 GHz, 512 RAM rodando o sistema operacional Debian Linux 3.0, utilizando-se o simulador NS (Network Simulator) versão 2.1b9a.

As simulações foram feitas em 3 topologias diferentes:

- Rede 50X50 com 50 nodos aleatoriamente distribuídos.

- Rede 100X100 com 100 nodos aleatoriamente distribuídos.
- Rede 200X200 com 200 nodos aleatoriamente distribuídos.

Cada experimento foi realizado 33 vezes e os dados apresentados são a média aritmética destas simulações.

O modelo de rádio utilizado foi o mesmo apresentado em [3]. Neste modelo o rádio dissipa $E_{elec} = 50nJ/bit$ no circuito para transmitir ou receber dados e $E_{amp} = 100 pJ/bit/m^2$ para o amplificador de transmissão. Os rádios possuem controle de potência e podem gastar a mínima energia para alcançar o seu alvo. Os rádios podem ser desligados para se evitar o recebimento de transmissões não desejadas.

As equações utilizadas para se calcular o custo da transmissão e recebimento para uma mensagem de k bits e uma distância d são mostradas abaixo [3]:

$$ETx(k, d) = ETx_{elec}(k) + ETx_{amp}(k, d)$$

$$ETx(k, d) = E_{elec} * k + E_{amp} * k * d^2$$

Recebimento

$$ERx(k) = ERx_{elec}(k)$$

$$ERx(k) = E_{elec} * k$$

Onde:

E_{tx} elec = Energia gasta na transmissão

E_{rx} elec = Energia gasta no recebimento

E_{tx} elec = E_{rx} elec = E_{elec}

E_{amp} = Amplificador de transmissão.

A energia de cada nodo foi fixada em 1J no início da simulação. Os outros parâmetros seguiram o mesmo padrão de [3]. O tamanho do pacote de dados utilizado na simulação foi 2000 bits. O tamanho do *round* foi calculado como em [3], ou seja, a energia inicial de cada nodo multiplicada por 18. A condição de parada da simulação foi fixada quando restavam 5% - 1 dos nodos totais ainda ativos na rede.

O gráfico da Figura 2 apresenta o total de dados transmitidos. Em uma rede com 50 nodos o ganho do CHDOS foi de 4,7% em termos de dados transmitidos. Já para os experimentos com uma rede de 100 nodos o ganho foi de 39,5% e para os experimentos com uma rede de 200 nodos o ganho foi de 149%. Este ganho deve-se principalmente ao fato de que o gasto de energia é diretamente proporcional ao quadrado da distância de transmissão.

No CHDOS os nodos líderes transmitem os dados para o vizinho mais próximo e na direção da estação base. Isto acarreta em uma redução da energia dependida e por consequência num aumento de dados transmitidos.

Pode-se observar que na rede com 200 nodos, a quantidade de dados transmitida é menor do que na rede com 100 nodos. Isso ocorre devido a dimensão da área sensorizada continuar a mesma e haver um expressivo aumento no número de nodos. Isto acaba por sobrecarregar a rede que neste caso atinge seu ponto de saturação aproximadamente com 100 nodos. Este fato pode ser observado também na Figura 3.

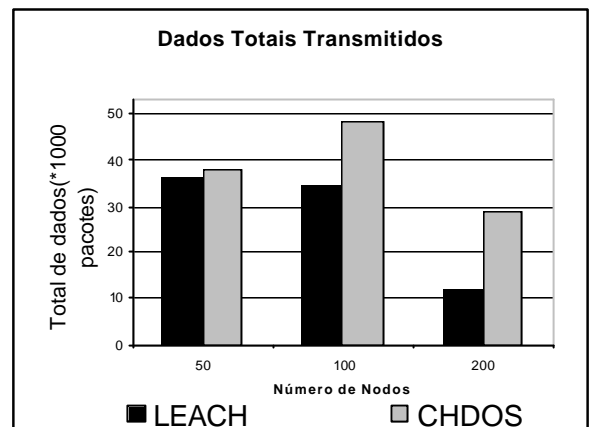


Figura 2 – Gráfico de dados totais transmitidos

Quando os nodos sensores esgotam sua energia, eles param de enviar dados de sensoriamento de sua área de cobertura. Isto eventualmente pode levar ao aparecimento de áreas descobertas dentro da rede. O gráfico da Figura 3 mostra o tempo de desligamento do primeiro nodo para os 3 cenários simulados. O ganho para 50 nodos foi de 275,3%. Para 100 nodos, o ganho foi de 418,5% e para 200 nodos o ganho foi de 900,5%. Isto mostra que o CHDOS retarda o aparecimento de áreas descobertas na rede de sensores, justamente por diminuir a transmissão de dados dos nodos líderes para longas distâncias.

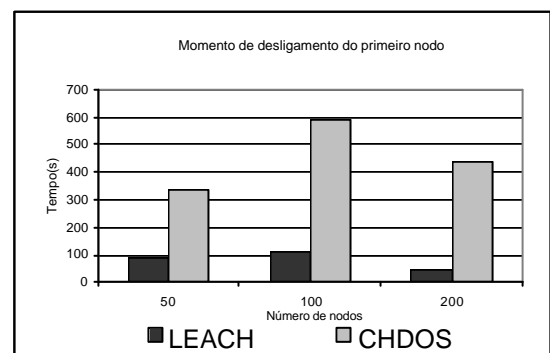


Figura 3 - Momento de desligamento do primeiro nodo

Os gráficos da Figura 4 mostram a quantidade de dados transmitidos em função do tempo para os três cenários simulados. Podemos observar que nos três cenários o CHDOS apresentou um ganho expressivo em termos da quantidade de dados transmitidos à estação

Dados Transmitidos X Tempo

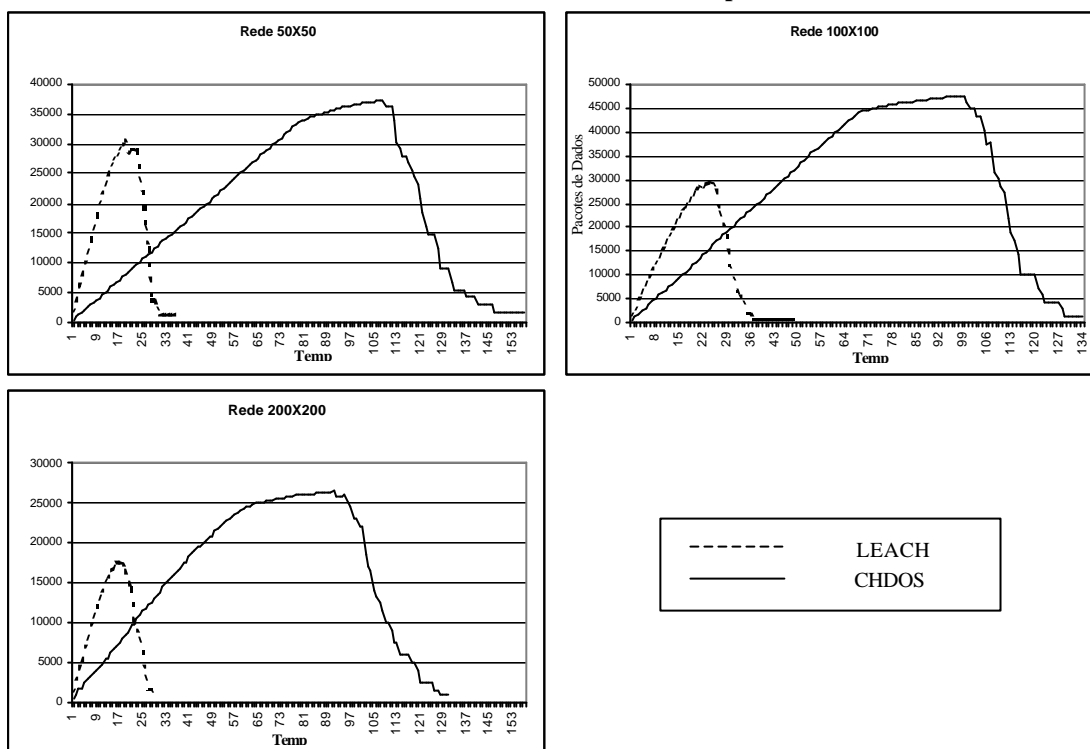


Figura 4 – Gráfico de dados totais transmitidos de acordo com o tempo

rádio base. É considerado como um dado transmitido cada pacote que chega à estação rádio base com dados sensorizados. Fica claro com estes gráficos que o CHDOS não só aumenta o tempo de vida da rede como também transmite um volume expressivamente maior de dados.

4. Conclusões

Foi apresentado aqui um novo algoritmo de roteamento para redes de sensores sem fio que tenta contornar os principais problemas de dois dos mais referenciados algoritmos de roteamento para RSSF, o LEACH e do PEGASIS. O CHDOS apresenta um ganho de 4,7% a 149% no número de dados transmitidos e um ganho que variou de 25,3% a 900,5% no início da degradação da rede quando comparado com o LEACH. Estes ganhos foram devido, principalmente, à diminuição da distância de transmissão dos dados. Isto porque no LEACH, os nodos líderes de cada grupo transmitiam seus dados diretamente para a estação base enquanto que no CHDOS os dados são transmitidos diretamente para a estação base.

Os resultados são animadores e mostram o potencial do algoritmo. Os próximos passos são simular o PEGASIS e comparar os possíveis ganhos do CHDOS com relação a latência e economia de energia. Outro fator importante que precisa ser explorado é que o artigo que

define o PEGASIS [2] é vago com relação as estatísticas apresentadas. O artigo apenas mostra que o tempo de vida da rede no PEGASIS é maior, mas não se fala em quantidade de dados transmitidos nem qual é o impacto da latência nos dados recebidos pela estação rádio base.

5. Referências

- [1] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 1, No. 4, October 2002, pp. 660-670.
- [2] S. Lindsey, C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems", IEEEAC, 2001.
- [3] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks" Published in the Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2000, Maui, Hawaii.
- [4] Bhaskar Krishnamachari, Deborah Estrin and Stephen Wicker, "Modelling Data-Centric Routing in Wireless Sensor Networks," USC Computer Engineering Technical Report CENG 02-14, 2002.

- [5] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E., "**A Survey on Sensor Networks**", IEEE Communications Magazine, August 2002.
- [6] G.J Pottie and W.J.Kaiser, "**Wireless Integrated Network Sensors**", Communications of the ACM, Vol43, No 5, pp 51-58, May 2000.