

PS-1089

## AN EVALUATION OF THE NETWORKS TOPOLOGIES STAR AND MESH OF THE ZIGBEE STANDARD: ANALISE IN REAL ENVIRONMENTS.

Jorge R. Beingolea Garay (Laboratory of Integrated Systems Polytechnic School of the University of Sao Paulo - Brazil ) [Jorge@pad.lsi.usp.br](mailto:Jorge@pad.lsi.usp.br)  
Sergio Takeo Kofuji (Laboratory of Integrated Systems, Polytechnic School of the University of Sao Paulo – Brazil) - [kofuji@pad.lsi.usp.br](mailto:kofuji@pad.lsi.usp.br)

This paper presents a performance comparative study of the topologies Star (Star) and Mesh (Mesh) proposed in the standard ZigBee at the network layer and adopted by several the Wireless Sensor Network (wsn). The experiments are accomplished in indoor and outdoor environments considering the relationships of coverage distance and package loss rate. The configuration and programming of the sensor nodes were made over the TinyOS 2.0 Operating System and for the analyses of energy consumption a system is used based on LabView and a PXI-DAQ. It is evaluated how these topologies affect the wsn measuring the throughput, packet loss and consumption of energy.

Key-words: Wireless Sensor Networks, topology Network, Performance, ZigBee, 802.15.4

## UMA AVALIAÇÃO DAS TOPOLOGIAS ESTRELA E MALHA DO PADRÃO ZIGBEE: UMA ANALISE EM AMBIENTES REAIS.

Este artigo apresenta um estudo comparativo de desempenho das topologias Estrela (Star) e Malha (Mesh) propostas no padrão ZigBee através da camada de rede e adotadas por muitas Redes de Sensores sem Fio (RSSF). Os experimentos são realizados em ambientes internos e externos considerando as relações de distância de cobertura da rede e taxa de perda de pacotes. A configuração e programação dos nós sensores foi feita através do S.O TinyOS 2.0. Para a análise de consumo de energia é empregado um sistema baseado em LabView e uma PXI-DAQ. Avalia-se como estas topologias afetam o desempenho da uma rede de sensores utilizando-se como métricas: a vazão de dados, taxa de perda de pacotes e consumo de energia.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio, Topologias de rede, Desempenho, ZigBee, 802.15.4

## 1. Introdução

Um dos maiores desafios nas redes *ad-hoc* e nas redes de sensores sem fio (RSSF) é desenvolver técnicas de comunicação que resultem em baixo consumo de energia, uma vez que este recurso é sempre limitado neste tipo de rede. Como resposta a esta necessidade, verifica-se a aparição de novos padrões de comunicação que procuram resolver tais limitações com baixas taxas de transmissão de dados em frequências altas, como é o caso do padrão ZigBee [Zigbee 2005] baseado na norma IEEE 802.15.4 [802.15.4, 2003]. O padrão ZigBee propõe o uso de técnicas de gerenciamento de energia e modulação em quadratura de fase O-QPSK. Isso permite uma maior taxa de transmissão de pacotes em um tempo menor diminuindo o consumo de energia do nó. O padrão propõe também o uso de modelos eficientes de comunicação baseados em *Beacon* [Beingolea; Kofuji; Cardoso, 2007] e CSMA/CA.

A criação de soluções para melhorar o desempenho das RSSF tem tomado a atenção de pesquisadores com o objetivo de desenvolver novas técnicas de comunicação entre os elementos da rede, e dessa forma garantir a existência da mesma por um tempo maior; entre estas soluções encontram-se o uso de topologias Estrela (*Star*), Malha (*Mesh*), *peer-to-peer* [802.15.4, 2003] [Zigbee, 2005], que permitem maiores áreas de cobertura e consumo menor de energia nos diferentes ambientes de comunicação. Otimizações de transferência de dados em topologias malha são realizadas por [Manssor et. Al. 2005]. Bassam (2006) realiza um estudo de QoS em redes malha através da implementação de *gateways*. Em [Draves et al 2004] é realizado um estudo de técnicas de transmissão multi-rádio e multi-salto para redes malha. Alicherry et al. (2006) realizam uma proposta da aplicação de um algoritmo de seleção de canais para otimização e confiabilidade na transmissão de dados.

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência de uma Rede de Sensores sem Fio (RSSF) com padrão ZIGBEE, comparando duas topologias: Estrela e Malha, em ambiente interno e externo. O objetivo específico é determinar qual das duas topologias oferece melhor eficiência de comunicação, adotando as seguintes métricas: vazão de dados (quantidades de pacotes transmitidos), perda de pacotes (quantidade pacotes perdidos durante a transmissão) e consumo de energia (medição de energia utilizada durante a cobertura da rede).

Este artigo está organizado nos seguintes tópicos: inicialmente são apresentadas as Topologias de Rede ZigBee onde se faz uma breve introdução às topologias que fazem parte desta pesquisa. Em seguida são comentadas as características básicas do Roteamento ZigBee e a apresentação do protocolo *SurgeTelos*; posteriormente são detalhados os procedimentos para a realização do teste em cenário real e a forma de medição do desempenho. Finalmente, são apresentados resultados em relação às métricas utilizadas que são comentados na conclusão.

## 2. Topologias de Rede ZigBee

O padrão ZigBee contempla três topologias a nível da camada de rede, as quais são: Topologia Estrela (*Star*), Topologia Malha (*Mesh*) (Figura 1) e a Topologia em Árvore (*Cluster Tree*), das quais só as topologias Estrela e Malha fazem parte de nosso estudo.

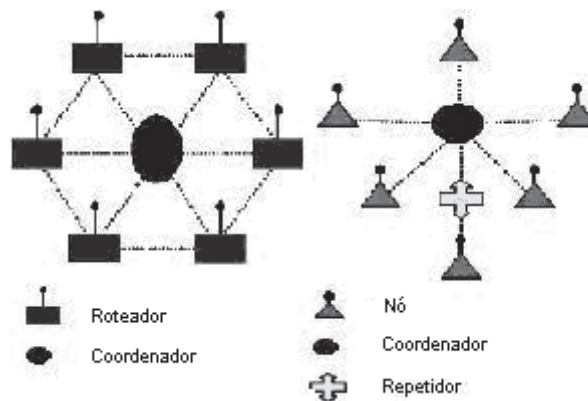


Figura 1. Topologias Estrela e Malha

- a) *Topologia Estrela*, Na topologia em estrela, todos os nós são coordenados por um nó FDD (*Function Device*) o qual é denominado como PAN (*Personal Área Network Coordinator*) e que controla o acesso ao meio. Os outros dispositivos são os RFD (*Reduced Function Device*) e suportam uma funcionalidade reduzida e são controladas pelo coordenador PAN , o qual indica os períodos em que é possível transmitir, através de um mecanismo de sinalização.
- b) *Topologia Malha*, Nas redes de tipo malha , os nós atuam como encaminhadores de pacotes de outros nós que não se encontram na área de conexão direta com os seus destinos [Lee et. al., 2006]. Na classificação das redes de tipo malha se tem: i) rede malha com infra-estrutura e ii) rede malha sem infra-estrutura. Na rede malha com infra-estrutura temos nós que realizam tarefas específicas ou prestação de serviços específicos. No entanto, para o caso das redes malha sem infra-estrutura, os nós móveis têm os mesmos serviços e se conectam entre eles de forma arbitrária cooperando para formar uma rede (as quais são conhecidas como redes *ad-hoc* ou *manet*) [Draves; Padhye; Zill, 2004]

Pode-se observar na Figura 1 que os componentes integrantes da rede são o coordenador, os roteadores e os dispositivos finais (*end devices*).

- *O coordenador* inicia a rede definindo o canal de comunicação usado, gerencia os nós da rede e armazena informações sobre eles;
- *Os roteadores* são responsáveis pelo encaminhamento das mensagens entre os nós da rede;
- *Os dispositivos finais* podem ser dispositivos bem mais simples, só se comunicando com outro nó da rede.

### 3. Roteamento ZigBee

Os sistemas de comunicação desenvolvidos para redes sem fio devem sempre considerar que a conectividade entre os nós é realizada através de múltiplos saltos (*Multihop*). Como consequência, o tipo de comunicação utilizada deverá providenciar as condições necessárias para que todos os nós da rede consigam uma comunicação efetiva, mesmo que esta seja realizada de forma indireta através de seus vizinhos, que é uma das principais características das RSSF. Tais parâmetros devem ser contemplados com o objetivo de maximizar e conservar as especificações do padrão ZigBee.

Entre os protocolos existentes na camada de rede, podemos citar o *Surge-Telos*, o qual é codificado sobre as características da norma 802.15.4 e o padrão ZigBee (Figura 2). Este protocolo possibilita a configuração dos modelos de transmissão com *beacon* e sem *beacon*, e a flexibilidade de seu código permite a variação do *payload* de dados segundo sejam as características e demandas da aplicação em uso.

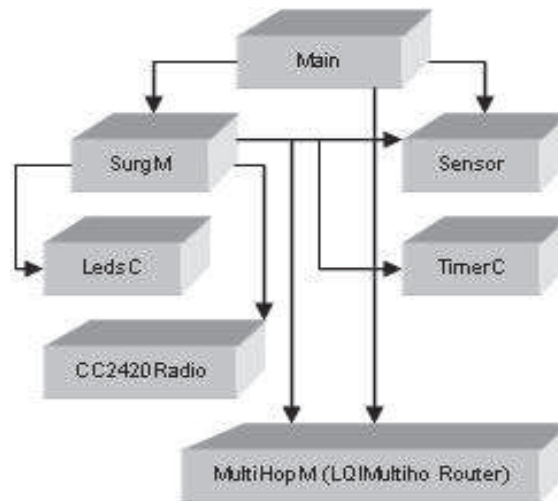


Figura 2. Diagrama de blocos do protocolo *Surge-Telos*

## 4. Experimentos

### 4.1 Considerações Iniciais.

É comum que as simulações em software não repliquem as mesmas condições de obtenção de dados de uma situação real, pois não conseguem capturar os erros que ocorrem na iteração do hardware transmissor sem fio e o ambiente de propagação. Por isso faz-se evidente a necessidade de mais trabalhos realizados em cenários reais com o objetivo de determinar os fenômenos que possam influenciar negativamente o desempenho da rede.

Neste trabalho é utilizado um cenário real para a realização dos experimentos obtendo-se resultados de maior exatidão que possam servir de auxílio nas futuras implementações de RSSF através do uso das topologias em questão. Consideram-se como métricas de desempenho a vazão de dados, a taxa de perda de pacotes e o consumo de energia. Para a realização dos experimentos são utilizados dois tipos de cenários. O primeiro deles é um cenário interno de 300m<sup>2</sup>. O segundo cenário é um

ambiente externo de 1000m<sup>2</sup>. Em ambos cenários é montada uma rede baseada no dispositivo TmoteSky [Moteiv, 2006]. No percurso da realização dos experimentos é criada uma relação entre a área de alcance da rede, a vazão de dados e a taxa de perda de pacotes, tudo isto em relação à topologia empregada medindo finalmente o consumo de energia dos nós da rede.

## 4.2 Hardware

O TmoteSky (Figura 3), desenvolvido pela Moteiv Corporation [Moteiv, 2006], é a última geração de motes de Berkeley, compatível com o TelosB [Crossbow, 2006] são motes (nós) baseados no padrão ZigBee, com baixo consumo de energia, baixas taxas de transmissão de dados (250Kbps) e aplicações para RSSF. O transmissor RF CC2420 [Chipcon, 2006] opera na banda ISM de 2.4GHz o que permite a inter-operatividade com outros dispositivos 802.15.4. O sistema de rádio usa modulação O-QPSK, um microcontrolador MSP430 de 8MHz da Texas Instruments, com 10K RAM e 48K de Flash, uma interface de programação e coleta de dados via USB.



Figura 3. Hardware utilizado nos experimentos (TmoteSky).

## 4.3 Configurações

A rede experimental é composta por dez nós sensores, sendo que um nó sensor é configurado na base como coordenador e outros nove como dispositivos comuns. O hardware utilizado para a programação dos nós sensores é um servidor *Opteron* de 64 bits fornecido pela *Sun Microsystems*. O sistema operacional compilado nos nós sensores é o TinyOS 2.0, o modelo de transmissão utilizado é com *beacon* (*Beacon-Enabled*), o tamanho do *frame* configurado é de 30 bytes. A configuração do temporizador para o ciclo de envio de pacotes de dados é 1000ms (*int INITIAL-TIMER-RATE = 1000*). O período de tempo determinado para a captura dos Logs da rede foi de 300s (5 minutos).

A distribuição dos nós sensores sobre a Topologia Estrela é representada na figura 4, sendo que o nó coordenador está localizado na parte central da rede, os outros nós são distribuídos de forma estruturada representando uma estrela, isto com o objetivo de conservar a estrutura da topologia (ver figura 4) .

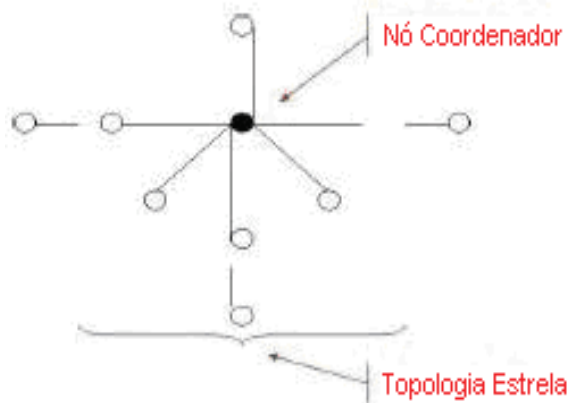


Figura 4. Distribuição da rede – Topologia Estrela.

A segunda distribuição corresponde à Topologia Malha e são considerados os mesmos critérios de distribuição (Figura 5) como na topologia estrela estruturando a rede de forma que seja possível alcançar a distancia máxima de cobertura considerando que são usados só dez nós para cada topologia.

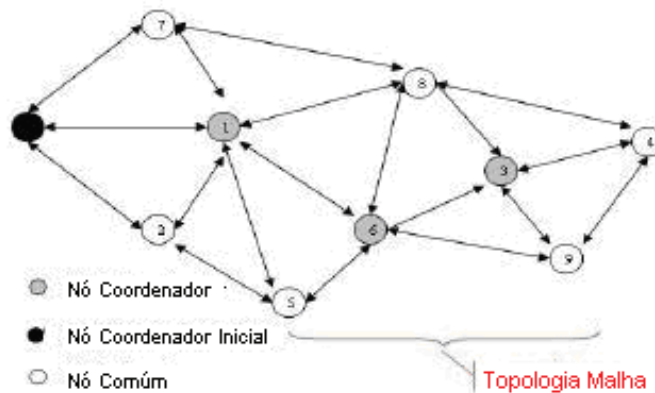


Figura 5. Distribuição da rede – Topologia Malha.

#### 4.4 Ferramenta para a análise de consumo de energia.

O consumo de energia de um sistema de teste é determinado normalmente de duas formas através de um resistor de *shunt*. Na primeira forma são amostrados os valores da fonte e das pontas de corrente, que é tipicamente uma função linear de corrente através do braço (1). Na segunda forma são amostrados os valores da fonte e a tensão no resistor de shunt, que é uma função direta de corrente. O consumo de energia total do sistema em experimento pode ser calculado como indicado em 2 (2) [Raskovic, 2004].

$$P_{SUT} = V_{SUT} = V_{Supply} \cdot II = f(V_{CPROBE}) \quad (1)$$

$$P_{SUT} = V_{SUT} = V_{Supply} - V \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (2)$$

Existem outras formas de avaliar o consumo de energia de um sistema em teste como em [Chang; Kim; Lee, 2002] onde se utiliza um sistema baseado na transferência de energia. Entretanto, esta tecnologia demanda um custo elevado de implementação e tempo e não é necessária para determinar baixos níveis de consumo de energia. O sistema utilizado neste trabalho (Figura 6) provê o nível de qualidade necessária para a avaliação do consumo de energia dos nós sensores.

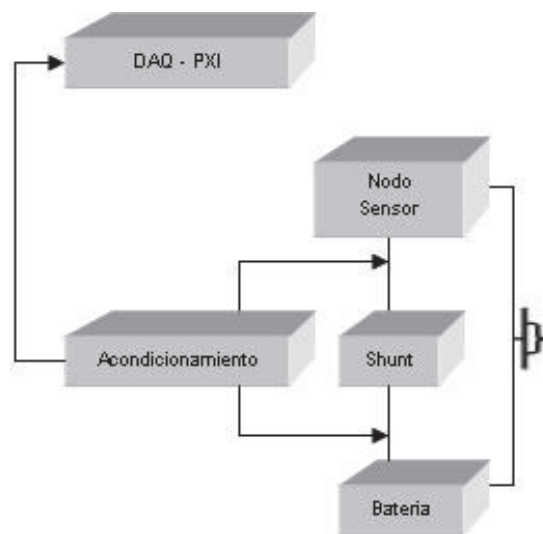


Figura 6. Diagrama de blocos do sistema utilizado.

O sistema empregado foi uma resistência de shunt de 10ohm. Os valores de tensão são lidos por uma placa DAQ (Placa de aquisição de dados) através de um PXI-6071E da National Instruments. Um *Vi* (Instrumento Virtual) codificado através da linguagem de programação gráfica *LabView*, controlando o PXI, realiza a coleta dos dados e o processamento dos valores lidos (Figura 7).

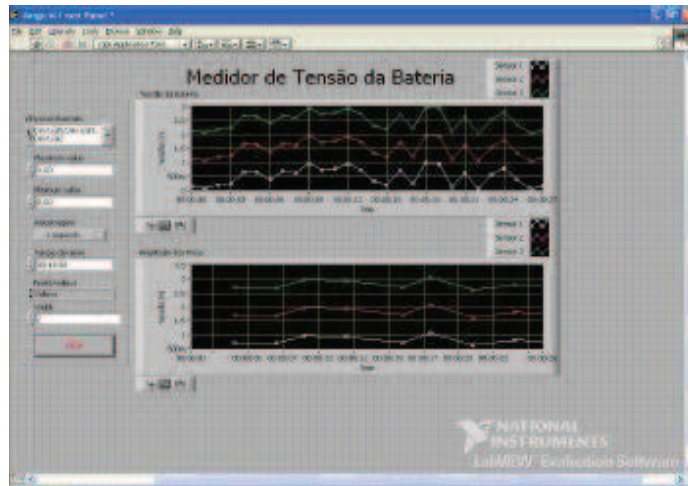


Figura 7. Interface do Vi

As configurações na interface de software (*Vi*) são editadas conforme sejam as necessidades da aplicação (frequência de amostragem, voltagem, tempo de teste, etc.).

## 5. Resultados

Foram consideradas e observadas as seguintes métricas:

- *Vazão de dados*, é o número de bits que são transmitidos pelos nós sensores até o nó coordenador.
- *Taxa de perda de pacotes*, é o número de pacotes perdidos na transmissão realizada pelos nós até o coordenador.
- *Energia*, é o consumo de energia dos nós sensores segundo o tipo de topologia em uso.

### a) *Vazão de dados*.

O primeiro parâmetro a ser avaliado é a vazão de dados para ambas as topologias de rede. Os resultados obtidos dos experimentos respondem a sua realização tanto em ambientes interno como externo.

A primeira topologia a ser avaliada é a Topologia Estrela. Os experimentos sobre o comportamento da mesma tanto em ambientes interno como externos são apresentados nos gráficos das figuras 8 e 9.



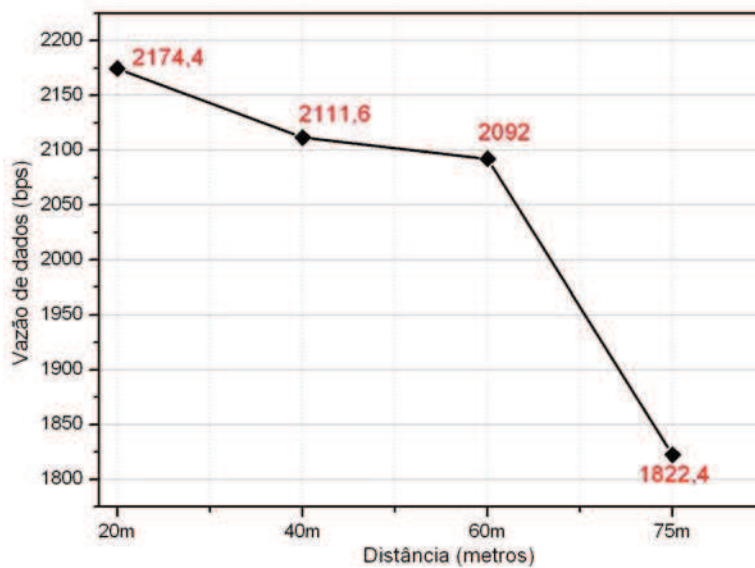


Figura 8. Vazão de dados topologia estrela – Ambiente Interno.

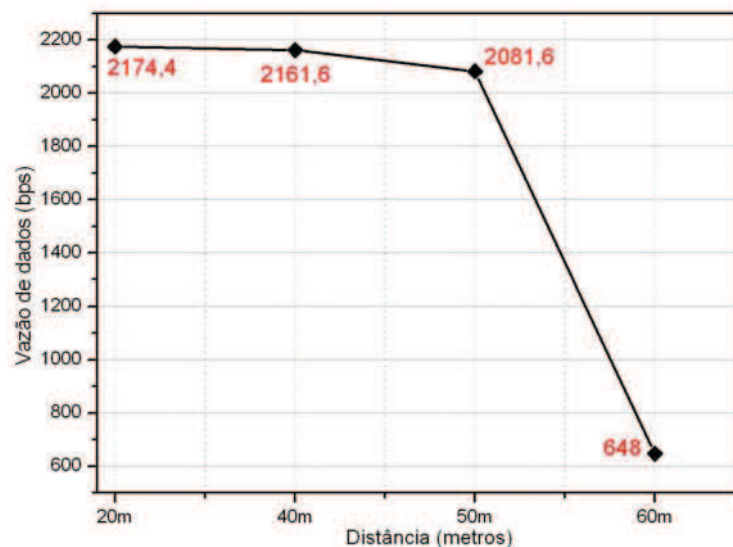


Figura 9. Vazão de dados topologia estrela – Ambiente Externo.

Observa-se nos gráficos das figuras 8 e 9, que existe um bom comportamento da topologia estrela até os 75m em um ambiente interno e aos 50m em um ambiente externo. Entretanto, ao longo da realização dos experimentos observou-se uma comunicação contínua entre os nós sensores, isto é, os nós da rede apresentam pouco tempo de inatividade.

O experimento realizado sobre a Topologia Malha se restringem a um ambiente externo devido a que segundo experimentos iniciais este tipo de topologia só evidencia suas potencialidades neste tipo de ambientes. Os resultados são apresentados no gráfico da figura 10.

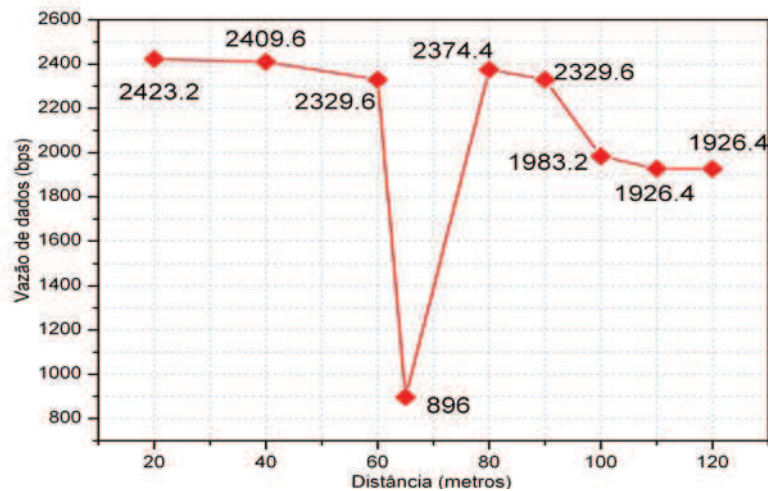


Figura 10. Vazão de dados Topologia Malha

Observa-se no gráfico da figura 10, que existe uma queda significativa de vazão aos 65m, isto é devido a que com o objetivo de incrementar a cobertura da rede incrementou-se a distância de separação entre os nós; inicialmente foi de 15m a 20m, o qual originou uma queda significativa ao atingir uma distância superior de alcance do nó sensor. Finalmente essa distância de separação foi definida em 10m conseguindo um ótimo comportamento da rede.

Uma das características observadas na RSSF sobre a topologia malha é que o incremento da densidade da rede cria um número maior de nós vizinhos diversificando o número de rotas de um nó para outro nó, com o qual se espera obter um consumo menor de energia e uma melhor organização da rede.

b) *Taxa de Perda de Pacotes.*

A realização dos experimentos de perda de pacotes é realizada de forma simultânea e nos mesmos cenários dos experimentos realizados das topologias estrela e malha considerando o mesmo número de nós e as distâncias de cobertura da rede. Os resultados dos experimentos são apresentados nas tabelas 1, 2,3.

Distância(m)	Pacotes Tx	Pacotes Rx	%	Pacotes Perdidos	%
20	2720	2718	99,93	2	0,07
40	2650	2640	99,62	10	0,38
60	2650	2615	98,68	35	1,32
75	2500	2278	91,12	222	8,88

Tabela 1. Perda de Pacotes – Topologia Estrela (Ambiente Interno).

Distância(m)	Pacotes Tx	Pacotes Rx	%	Pacotes Perdidos	%
20	2720	2718	99,93	2	0,07
40	2720	2702	99,34	18	0,66
50	2650	2602	98,19	48	1,81
60	2500	810	32,4	1690	67,6

Tabela 2. Perda de Pacotes – Topologia Estrela (Ambiente Externo).

Pode-se observar (Tabelas 1 e 2) que a taxa de perda de pacotes para RSSF sobre a topologia estrela valida os resultados de vazão de dados obtidos em ambos ambientes de comunicação estabelecendo uma distância máxima de 75m para ambientes internos com 8,88% de perda e de 50m para ambientes externos com 1,81% de perda.

A eficiência é determinada em função da integridade da informação transmitida sendo que valores de perda de pacotes superiores aos 9% do total da informação transmitida apresentam pouca confiabilidade da informação transmitida pelos nós na RSSF.

Na topologia malha os experimentos de perda de pacotes são realizados com a rede funcionando de forma eficiente aos 120m considerando a distância de separação máxima de 10m entre os nós sensores, eliminando a perda inicial aos 65m.

Distância(m)	Pacotes Tx	Pacotes Rx	%	Pacotes Perdidos	%
20	3030	3029	99,97	1	0,03
40	3030	3012	99,41	18	0,59
60	2950	2912	98,71	38	1,29
80	2950	2912	98,71	38	1,29
100	2500	2479	96,32	21	0,84
120	2500	2408	99,0	92	3,68

Tabela 3. Perda de Pacotes – Topologia malha (Ambiente externo).

### c) *Consumo de Energia.*

Como resultado dos experimentos de consumo de energia se observou na rede organizada sobre a topologia estrela, um consumo constante e significativo em relação aos nós organizados sobre a topologia malha.

Os nós da topologia estrela realizam um consumo inicial de 20,6mA, sendo que o consumo máximo alcança os 23mA de forma que o valor inicial corresponde ao estado de sincronismo do sistema de rádio do nó.

Para o caso dos nós sobre a topologia malha observa-se um consumo menor que inicia aos 17.83mA e atinge os 20,6mA. Na rede de tipo malha os nós não possuem uma comunicação constante entre eles e os estados dos dispositivos variam constantemente entre transmissor e receptor, uma que vez que estes atuam como

encaminhadores dos *frames* de outros nós, alias, existe também uma mudança constante entre estados de espera (*Idle*) e dormindo (*Sleep*) do sistema de comunicação dos nós.

## 6. Conclusões

O objetivo deste trabalho é de avaliar o desempenho das topologias Malha e Estrela propostas pelo padrão ZigBee no contexto de uma rede de sensores sem fio (RSSF) , com experimentos realizados tanto em ambientes internos como externos.

Com os resultados pode-se concluir em uma clara eficiência da topologia malha quando se desejam atingir grandes áreas de cobertura, proporcionando uma configuração flexível, baixas taxas de consumo de energia e suporte para RSSF de alta densidade entre seus dispositivos.

Entretanto a topologia em estrela apresenta um melhor comportamento em ambientes internos. Apesar de esta ultima mostrar um consumo de energia maior que na topologia malha é possível considerar sua implementação em aplicações de monitoramento onde seja possível contar com fontes de energia fixa. Os resultados da área de cobertura segundo o tipo de topologia empregada e sua eficiência em função da taxa de perda de pacotes são apresentados em resumo na tabela 4.

Topologia	Cenário	Alcance	Nº Nós	bps	PLoss	Eficiência %
Estrela	Interno	75	10	1822,4	8,88	91,12
	Externo	50	10	2081,6	1,81	98,19
Malha	Externo	120	10	1926,4	3,68	96,32

Tabela 4. Alcance e eficiência das topologias estrela e malha.

As redes malha se caracterizam pela sua alta densidade sendo às vezes pouco justificável o fato de montar uma rede densa com esta topologia em um ambiente interno. Entretanto, a implementação de uma RSSF através da topologia malha em um ambiente externo maximiza as potencialidades de cobertura da rede e melhora a eficiência na transmissão dos dados atingindo uma considerável vazão e uma perda reduzida de pacotes em longas distâncias.

## Referências

- Bassam, Aoun; Raouf, Boutaba; Youssef, Iraqi And Gary Kenward. (2006) Gateway Placement Optimization in wireless mesh networks with QoS constraints. IEEE Journal of Selected Areas in Communications.
- Beingolea, G. J.; Kofuji, S.; Cardoso, J. (2007) Eficiência dos Modelos de Transmissão de Dados do Padrão ZigBee - IEEE 802.15.4 Numa Rede de Sensores Sem Fio. Escola Regional de Redes de Computadores. ERRC. pp. 1-8.
- Chang, N.; Kim, K.; Lee, H. G. (2002) Cycle-accurate Energy Measurement and Characterization With a Case Study of the ARM7TDMI, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, vol. 10, pp. 146 - 154.
- CHIPCON, Radio CC2420 RF Transceiver, Datasheet.\\ Disponível Em: <http://www.chipcon.com>. Acesso em: Março. 2006.
- Crossbow Wireless Sensor Network. TelosB Mote Research. Data sheet.\\ Disponível Em: <http://www.xbow.com>. Acesso em: Janeiro. 2006.
- Draves, R.; Padhye, J., And Zill, B. (2004), Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks, in ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM).
- IEEE 802.15.4 Institute of Electrical and Electronics Engineers (2003) Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS). pp.679. 2003. retirado de [www.IEEE.org](http://www.IEEE.org) em agosto do 2004.
- Lee, J. M.; Zheng, J.; Young-Bar, K.; Deepesh M. (2006) Emerging Standards For Wireless Mesh Technology, IEEE Wireless Communications. pp. 1 - 8.
- Mansoor, A.; Randeep, B. And Li (Erran). (2005) Joint Channel Assignment And Routing For Throughput Optimization In Multi-Radio Wireless Mesh Networks, Mobicom '05: Proceedings Of The 11th Annual International Conference On Mobile Computing And Networking. pp 58-72.
- Moteiv Corporation (2006) TmoteSky Brochure/Datasheet. Disponível Em: <http://www.moteiv.com/products/docs/tmote-sky-datasheet.pdf>. Acesso em: Março. 2006.
- Raskovic, D. (2004) Energy-efficient Hierarchical Processing in the Network of Wireless Intelligent Sensors (WISE), Ph.D. Thesis, ECE Dept., University of Alabama in Huntsville.
- ZigBee Alliance (2005). ZigBee Public Home Page. <http://www.zigbee.org/>.