

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE
CAMPUS DE NATAL
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

MATHEUS DE OLIVEIRA ARAÚJO

**ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA A RSSF:
UMA REVISÃO DA LITERATURA**

**NATAL
2015**

MATHEUS DE OLIVEIRA ARAÚJO

**ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA A RSSF:
UMA REVISÃO DA LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN – como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Felipe Denis Mendonça de Oliveira

**NATAL
2015**

MATHEUS DE OLIVEIRA ARAÚJO

**ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA A RSSF:
UMA REVISÃO DA LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de curso
apresentado à Universidade do Estado do
Rio Grande do Norte – UERN – como
requisito obrigatório para obtenção do
título de Bacharel em Ciência da
Computação

Aprovado em ____/____/____.

Banca Examinadora

Profº. Dr. Felipe Denis Mendonça de Oliveira
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Profº. Dr. Carlos Alberto de Albuquerque Silva
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Profº. Diego Arthur de Azevedo Morais
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dedico este trabalho aos meus pais, Mário Graciélio de Araújo e Maria Jaide de Oliveira Araújo (*in memoriam*), a Itamara Pinheiro (Boadrasta), aos meus irmãos e a minha namora Roseane, que contribuíram com todo o apoio para que este trabalho pudesse ser realizado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora Sant'Anna por me conceder a oportunidade de realizar este trabalho com muito esforço e dedicação que, mesmo com todos os momentos difíceis que passei ao longo do curso, consegui superá-los. A todos os meus familiares, em especial aos meus pais e irmãos, que sempre demonstraram torcer por minhas conquistas e me estruturaram como pessoa, sempre me aconselhando nos momentos difíceis a nunca desistir dos meus objetivos. A minha namora, Roseane Serpa, por todo carinho, compreensão, ajuda, paciência e por não ter me deixado sozinho em momento algum durante essa dolorosa jornada. Aos meus colegas e amigos de classe, em especial: Marieta, Serafim, Rafael Julian, Antônio Itamar e Edilene que estiveram do meu lado desde o início do curso, ajudando-me durante o período até a construção do TCC, para que eu pudesse chegar neste momento final da graduação. Aos meus grandes amigos de infância, os quais não citarei nomes para não ser injusto com ninguém, mas que tiveram grande importância, incentivando-me em todos os momentos, estando ao meu lado e me distraindo nos momentos de stress. A duas pessoas muito importantes, os quais me incentivaram a transferir o curso e que me acolheram aqui em Natal no início do curso, que são meus amigos Gustavo Moraes e Franklin Colle, meu muito obrigado, A todos os Professores do Curso de Ciência da Computação da UERN, em especial Ana Dantas, Camila Araújo, Alex, Francisco Piolho, Adriana Takahashi e ao meu orientador, Professor Felipe Denis, que não mediu esforços para me auxiliar ao longo do período de elaboração deste trabalho, muito obrigado e que Deus continue lhe abençoando hoje e sempre.

“Nós só podemos ver um pouco do futuro,
mas o suficiente para perceber que há
muito a fazer”

(Alan Turing)

RESUMO

É notório que a tecnologia sem fio é uma alternativa para solução de problemas em vários tipos de ambientes. Porém, em ambientes hostis, é inviável o envio constante de mão de obra para realizar operações rotineiras ou de manutenção, sendo um tipo de manutenção a troca da bateria esgotada nos sensores onde o custo pode ultrapassar o custo do próprio sistema de monitoramento. Portanto, é necessário manter a eficiência energética dos nós sensores, para que possuam maior durabilidade no ambiente sensoreado. Para tal, diversos protocolos de roteamento foram criados visando a economia de energia dos sensores. Entre estes protocolos de roteamento, existem os protocolos do tipo plano, para Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) planas e os protocolos do tipo hierárquico, para RSSF com vários níveis. Esta pesquisa visa promover um estudo sobre a eficiência energética de protocolos de roteamento, aplicados em RSSF. Foi realizada uma análise dos resultados da qualidade dos protocolos de roteamento, identificando qual das duas categorias em termos de eficiência energética é a melhor.

Palavras chaves: Rede Sensores Sem Fio. Eficiência Energética. Protocolos de Roteamento.

ABSTRACT

It is clear that wireless technology is an alternative to solve problems in a variety of environments. However, in harsh environments, it is impractical constant sending manpower to perform routine or maintenance, being a sort of maintenance replacing the dead battery in the sensor where the cost may exceed the cost of own monitoring system. Therefore, it is necessary to maintain the energy efficiency of sensor nodes so they have greater durability in sensing environment. To this end, many routing protocols are designed with a view to energy saving of the sensors. Among these routing protocols, there are the protocols of flat type for Sensor Wireless Network (WSN) flat and protocols of the hierarchical type, for WSN with multiple levels. This research aims to launch a study on the energy efficiency of routing protocols, applied in WSN. An analysis of the results of the quality of routing protocols was carried out by identifying which of the two categories in terms of energy efficiency is the best.

Keywords: Wireless Sensor Network, Energy Efficiency, Routing protocols.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: Principais aplicações das redes sem fio de curto alcance	19
FIGURA 2: Camadas de comunicação padrão IEEE 802.15.4	23
FIGURA 3: Operação para redução de energia em RSSF	27
FIGURA 4: Mapa de energia de uma RSSF	30
FIGURA 5: Deficiência de Flooding e Gossiping	33
FIGURA 6: Comunicação no Protocolo SPIN	35
FIGURA 7: Fases do Protocolo DD	36
FIGURA 8: O consumo de energia (FACOR x AODV)	37
FIGURA 9: Topologia da RSSF	41
FIGURA 10: Percentual médio de melhoria na quantidade de nós sem energia do HEED, FTE-LEACH e FTE-LEACH com VCH em comparação ao LEACH	45
FIGURA 11: Arquitetura TEEN	48

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Especificações da camada PHY	25
QUADRO 2: Comparação entre o LEACH e HT-LEACH	40
QUADRO 3: Dados para simulações	43
QUADRO 4: Comparação entre o PEGASIS e PEG-BBO	47
QUADRO 5: Classificação dos protocolos de roteamento para RSSF.....	55

LISTA DE ABREVIACOES

ADV	Mensagem de envio
AODV	<i>Ad-hoc On-demand Distance Vector</i>
APTEEN	<i>The Adaptive Threshold Sensitive Energy Efficient Network</i>
ARQ	<i>Automatic Retransmission Request</i>
BBO	<i>Biogeography-Based Optimization</i>
BMA	<i>Bit-Map-Assisted</i>
BS	Estaco Base
CARQ	Protocolo de pedido de retransmisso automática cooperativa
CH	<i>Cluster Head</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DATA	Mensagem de dados
DD	<i>Directed Diffusion</i>
DTMC	<i>Discrete Time Markov Chain</i>
ED	<i>Energy Detection</i>
FACOR	<i>Fuzzy ant Colony Optimization Routing</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
FTE-LEACH	<i>Fault-tolerant and Energy-efficient LEACH</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slots</i>
HT-LEACH	<i>Hierarchy Tree Routing Based on LEACH</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
LRWPAN	<i>Low Rate Wireless Personal Area Network</i>
LEACH	<i>Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>
MAC	Controle de Acesso ao Meio
MNs	Ns membros
NS-2	<i>Network Simulator 2</i>
PEGASIS	<i>Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems</i>

PHY	Camada Física
QoS	<i>Quality of Service</i>
REQ	Mensagem de requisição
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RSSF	Rede de Sensores sem Fio
SAS	<i>Slot Allocation Strategy</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
SPIN	<i>Sensor Protocols of Information via Negotiation</i>
TEEN	<i>Threshold Sensitive Energy Efficient Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	16
1.3 TRABALHOS RELACIONADOS	17
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2. REDES DE SENSORES SEM FIO	19
2.1 CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE SENSORES SEM FIO	21
2.2 PADRÃO IEEE 802.15.4	23
2.2.1 Camadas do Padrão IEEE 802.15.4	24
2.2.2 Dispositivos para composição da rede (IEEE 802.15.4)	25
3. CONSUMO DE ENERGIA EM RSSF	27
3.1 MÉTODOS DE ECONOMIA DE ENERGIA EM RSSF	27
3.1.1 Redução de tráfego de dados	28
3.1.2 Organização da rede	28
3.1.3 Sincronização dos dados	29
3.2 MAPAS DE ENERGIA DE UMA RSSF	30
4. TÉCNICAS DE ROTEAMENTO EM RSSF – CLASSIFICAÇÃO	32
4.1 PROTOCOLOS PLANOS	32
4.1.1 Flooding e Gossiping	33
4.1.2 Sensor Protocols of Information via Negotiation (SPIN)	34
4.1.3 Directed Diffusion (DD)	35
4.1.4 Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks Based on Fuzzy Ant Colony Optimization	36
4.2 PROTOCOLOS HIERÁRQUICOS	38

4.2.1 <i>Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)</i>	38
4.2.2 <i>Hierarchy Tree Routing Based on LEACH (HT-LEACH)</i>	39
4.2.3 <i>Fault-tolerant and Energy-efficient LEACH (FTE-LEACH)</i>	40
4.2.5 <i>Biogeography-Based Optimization (BBO)</i>	46
4.2.6 <i>Threshold Sensitive Energy Efficient Network (TEEN)</i>	47
4.2.7 <i>The Adaptive Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (APTEEN)</i>	48
5. VANTAGENS E OBJETIVOS DO AGRUPAMENTO	50
5.1 VANTAGENS E OBJETIVOS.....	50
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
6.1 TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

Uma Rede de Sensores Sem Fios (RSSF) é uma coleção de nós sem fio que trocam informações, e cada componente possui quantidade de energia limitada. Podem ser implantadas nos mais diversos tipos de ambientes, como em terrenos inacessíveis para outros equipamentos e seres humanos. As RSSF também podem ser usados em controle de produção em uma linha de montagem, monitorar ambientes internos ou externos, monitorar tráfegos de veículos em avenidas, segurança de edifícios, dentre outros. A escolha da estratégia de roteamento é uma questão importante para a entrega eficiente dos pacotes até o seu destino. Além disso, em tais redes, o método de roteamento aplicado deve assegurar o mínimo de consumo de energia e, conseqüentemente, a maximização do tempo de vida da rede (NIKOLAOS et al., 2007).

Segundo Moreira (2012), atualmente os computadores não são apenas para uso geral, mas também para uso em diversas áreas específicas, com isso surge a necessidade da utilização de sistemas menores, com baixo consumo de energia, baixo custo, quando comparados com os computadores de propósito geral e que possam ser aplicados em qualquer lugar, o mais remoto que seja. Portanto, a RSSF se torna uma solução viável.

Além da evolução desses equipamentos, existe um outro grande avanço, que foi a transmissão de dados, os mesmos são transmitidos por meio do ar (*Wireless*) facilitando a instalação e configuração de redes, sem a necessidade dos equipamentos conectados serem interligados por cabos, assim permitindo o movimento destes sem que haja a desconexão em um raio deliberado.

Desta forma, com o avanço que tem se dado na área de microprocessadores, novos mecanismos de sensoriamento e comunicação sem fio tem motivado o desenvolvimento e uso de sensores inteligentes em diversas áreas ligadas a processos biológicos, físicos, químicos, dentre outros. É comum ter em um único *chip* diversos sensores, os quais são controlados pela lógica do circuito integrado, com uma interface de comunicação sem fio. Comumente esse termo “Sensor Inteligente” é dado ao *chip* que contém um ou mais sensores com capacidade de comunicação de dados e processamento de sinais (LOUREIRO, et al., 2013).

A principal contribuição deste trabalho é fornecer um levantamento criterioso sobre os protocolos de roteamento em eficiência energética para RSSF de duas

categorias principais: Os roteamentos planos e os hierárquicos. Foi enfatizado sobre as técnicas destes protocolos a transmissão de mensagens, levando em consideração a energia que consomem e como eles minimizam este consumo, estendendo o tempo de vida da rede. Além disso, foram discutidos os pontos fortes e fracos dos protocolos fornecendo uma comparação entre eles, incluindo algumas métricas (escalabilidade, mobilidade, uso de energia, métricas, rota, tipos de mensagem periódica, robustez) para que pesquisadores e profissionais possam compreender as várias técnicas e, assim, ajudá-los a escolher a mais adequada, com base em suas necessidades.

1.1 JUSTIFICATIVA

O que impulsionou a realização deste trabalho foi expor e comparar quais protocolos são mais eficientes energeticamente em RSSF, já que tais recursos são bastante escassos nesta tecnologia tão promissora, apresentando conceitos, definições e tendência de uso dos protocolos desenvolvidos, em relação a eficiência energética, no sentido de nortear os pesquisadores sobre o que está sendo produzido no campo de sensoriamento remoto, levando em consideração que tais redes são utilizadas especialmente em ambientes inacessíveis ou de difícil acesso, que apresenta algum risco à vida do ser humano.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho objetiva estudar os tipos de padrões atualmente utilizados em Rede de Sensores Sem Fio entre eficiência energética e seus protocolos de roteamentos. Analisar os padrões e protocolos de roteamento mais utilizados ultimamente e suas características em RSSF ligados à eficiência energética, através de artigos e trabalhos científicos produzidos nos últimos anos. Assim, os pesquisadores da área de instrumentação remota terão à sua disposição uma compilação atual do estado-da-arte ligado à eficiência energética aplicada a RSSF.

1.3 TRABALHOS RELACIONADOS

Existem trabalhos no meio científico direcionados ao desenvolvimento de protocolos de roteamento em RSSF. O objetivo é que estes protocolos possam conciliar necessidades de aplicações e da topologia da rede. Porém, um fator como a eficiência energética afeta diretamente o tempo de vida da RSSF, este fator tem sido alvo de investigação de alguns trabalhos que serão apresentados a seguir.

Shafiullah, Azad e Ali (2013), propõem um novo protocolo chamado E-BMA que consegue melhor eficiência energética para baixos e médios tráfegos, minimizando o tempo ocioso durante o período de contenção. O protocolo E-BMA foi testado em aplicações ferroviárias, porém, adequado a propostas de comunicação de dados em redes sem fio genéricas. Modelos matemáticos e de simulação foram desenvolvidos para o E-BMA, e seu desempenho foi comparado com os protocolos EA-TDMA, TDMA e BMA em termos de eficiência energética. Os resultados das simulações mostram que o protocolo E-BMA supera todos os protocolos em todas condições de tráfegos, principalmente em tráfegos médios e baixos.

Alper, Ismail, Sedat e Suleyman (2014), descrevem os efeitos das estratégias de alocação de intervalo de tempo (SASs) sobre o consumo de energia em nós para protocolos MAC, baseados em assinatura de tempo, para a eficiência energética. O trabalho apresenta e compara a eficiência energética de SASs baseadas em transmissão, baseadas em recepção para topologias de múltiplos saltos usadas em MAC de RSSF. Uma simulação detalhada foi realizada usando amostra de rede utilizando o software OPNET MODELER. O estudo conclui que os SASs baseados em recepção são pelo menos 5 vezes mais eficientes energeticamente que as estratégias baseadas em transmissão, para topologias de rede de múltiplos saltos.

Hualiang et al (2012), propõem um protocolo de pedido de retransmissão automática cooperativa (CARQ) para RSSF, um modelo genérico da corrente de Markov de tempo discreto (DTMC), para analisar a taxa de transferência e eficiência energética do protocolo. Os resultados numéricos mostram que a eficiência energética do esquema é muito melhor do que o esquema ARQ tradicional.

Este trabalho apresenta uma análise sobre protocolos de roteamento energeticamente eficientes em RSSF. O objetivo final é fornecer indicações para que os pesquisadores escolham o protocolo mais adequado para a sua aplicação. Serão discutidos e analisados os pontos fortes e fracos de cada um dos protocolos, fazendo

uma comparação entre eles e apontando qual das duas categorias estudadas é a melhor em relação à eficiência energética.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

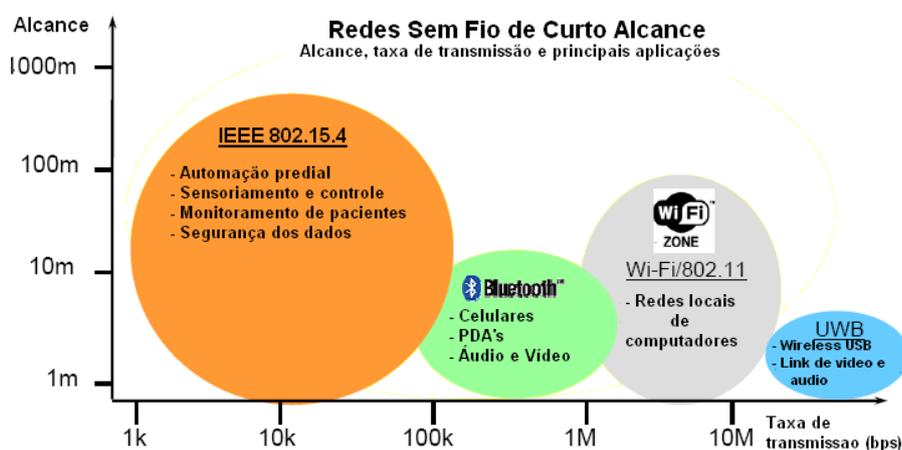
O presente trabalho está organizado como segue. No capítulo 1 está incluída a introdução, onde estão expostos os objetivos do trabalho de forma sucinta. Também se encontram a justificativa do tema, os objetivos e os trabalhos relacionados com o tema proposto, construídos para orientar e direcionar esta pesquisa. O capítulo 2 compreende o conceito das RSSF, suas características e o padrão IEEE 802.14.5. O terceiro capítulo contém conceitos sobre o consumo de energia nas RSSF, métodos de economia de energia, também é apresentado um mapa de energia para as RSSF. No capítulo 4 são apresentadas as técnicas de roteamento, suas classificações, citando e comparando as duas categorias de protocolos, demonstrando seus atributos e funcionalidades sobre a eficiência energética. No capítulo 5, são descritas as vantagens e objetivos do agrupamento, comparado aos protocolos planos. No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais do trabalho, sendo respondidos aí os objetivos e também a hipótese levantada no início desta pesquisa. Além disso, o capítulo apresenta recomendações para futuros trabalhos que possam ser realizados sobre a área estudada.

2. REDES DE SENSORES SEM FIO

As RSSF são compostas por um conjunto de sensores distribuídos em um determinado ambiente, com o objetivo de monitorar, instrumentar e até controlar o meio físico em questão. Pelo fato desse tipo de rede ser formada de nós sensores, se utilizam ondas eletromagnéticas para se comunicarem, sem a necessidade de conexão física por cabo. As RSSF são tecnologias em crescimento e que tem significativa relevância, possuindo um vasto campo de aplicações, nas quais podem ter diversas áreas de atuação, como por exemplo, na área científica onde os sensores são introduzidos no corpo humano para monitorar condições físicas, na indústria automobilística e produção industrial (OLIVEIRA, 2012).

Essas redes são utilizadas especialmente em ambientes inacessíveis de difícil acesso, que apresenta algum risco à vida do ser humano. Nestas redes, os nós sensores colhem os dados, que são transmitidos ao nó coordenador da rede, também conhecido como estação base, que por sua vez, envia estes dados para um *host*, ou outra rede por meio de um *gateway*. Estas redes fazem parte do subgrupo padrão WPAN (*Wireless Personal Area Network*), que é estabelecido pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) (IEEE: 802 LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE, 2013). Este subgrupo, intitulado IEEE 802.15, refere-se às redes sem fios de curto alcance e baixa taxa de transmissão: de aproximadamente algumas dezenas de metros como: o padrão IEEE 802.15.3 (UWB); IEEE 802.15.1 (*bluetooth*) e o IEEE 802.15.4, para as RSSF, denominado como padrão LRWPAN (*Low Rate WPAN*) (OLIVEIRA, 2009). Na Figura 1 estão ilustradas as principais tecnologias sem fio.

Figura 1: Principais aplicações das redes sem fio de curto alcance



Fonte: OLIVEIRA (2009).

Com o surgimento de novas tecnologias, as indústrias, de modo geral, estão investindo muito em novas aplicações, visando a melhoria de suas atividades internas e buscando reduzir os custos, de forma a intensificar seu desenvolvimento, sem querer abrir mão da qualidade de suas operações (SILVA, 2006). O elevado custo com manutenções, maior consumo de energia, menos segurança e mobilidade, são alguns fatores preponderantes que influenciam as indústrias a escolher pela substituição das redes com fio pelas redes sem fio. Estas, por sua vez, oferecem a possibilidade de serem instaladas em ambientes hostis, lugares de difícil acesso ao ser humano que seria inviável visitar constantemente para realizar manutenções (OLIVEIRA, 2012).

Cada RSSF é fundamentada no tipo da aplicação na qual esta rede foi elaborada para receber. Existem algumas características em comum a todas as RSSF, porém, a maioria dos atributos é característica de cada aplicação, pois isso assegura a resolução dos problemas também específicos. Cada rede é implementada para um propósito particular, dispondo de sensores apropriados para sua aplicação (LIMA, 2013).

Nas RSSF, devido a capacidade limitada de energia de suas baterias, o desafio dessa tecnologia é o de que ela funcione o máximo de tempo possível sem qualquer falha nos nós sensores, em relação à capacidade de energia nessas redes, ela é proporcional ao tamanho de cada nó sensor. Desta forma, quando se precisa utilizar nós de tamanho muito reduzido, a vida útil dessa rede também se reduz radicalmente, pois o tamanho dessa bateria não poderá ser grande.

Entre as RSSF existem atributos comuns, são eles: o número de sensores; a mobilidade dos sensores, os mesmos podem se deslocar durante a coleta de dados do sistema, sendo portanto, classificados em estáticos ou móveis; o endereçamento dos sensores, que dependem de suas funções e de como são utilizados, e a agregação dos dados, que consiste na capacidade que a rede possui de coletar dados e reuni-los (OLIVEIRA, 2012).

Diante dos argumentos expostos, é evidente que o avanço tecnológico possibilitou a idealização de sistemas fisicamente menores, com isso, proporcionando menos custos e mais mobilidade na execução de suas tarefas. Baseado nisto foi estimulado cada vez mais a utilização de sensores conectados a uma rede sem fio para resolver inúmeros problemas existentes.

2.1 CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE SENSORES SEM FIO

As RSSF apresentam características específicas conforme as áreas em que são aplicadas, por esse motivo, algumas configurações são modificadas para que sua arquitetura suporte certas limitações e especificidades, algumas dessas características e questões são discutidas a seguir (LOUREIRO, et al.,2003).

- **Endereçamento dos nós (Sensores):** Nas redes, cada sensor pode ser endereçado como sendo único ou não, dependendo de cada aplicação e suas necessidades.
- **Agregação dos dados:** Em RSSF, significa a capacidade de agrupar ou extrair os dados colhidos pelos nós sensores.
- **Mobilidade dos nós (Sensores):** Está relacionado à questão dos sensores poderem se mover ou não, levando em consideração o sistema em que estão sendo coletados os dados. Tendo como exemplo uma floresta onde são coletados dados sobre a temperatura e umidade, esses são considerados estáticos.
- **Restrições dos dados coletados:** Quando os dados são coletados pelos sensores, neste momento são apontados se existem algumas restrições, com relação ao intervalo de tempo máximo, para envio de seus valores a uma determinada entidade de supervisão.
- **Limitação da energia disponível nas RSSFs:** Em relação ao consumo de energia, esse é um dos principais pontos para o tempo de vida útil das redes, por este motivo, técnicas e algoritmos de roteamento são bastante importantes, pois ajudam a estabelecer a quantidade de dados que serão transmitidas nas redes. Tendo isto em mente, vale salientar que quanto maior for o volume de transmissão de informação de um nó, maior será o consumo das baterias, conseqüentemente, esgotará com maior facilidade. Para resolver esta “deficiência” existe uma alternativa, que seria usar a energia restante daqueles nós que possuem menos atividade de roteamento, que por conseqüência tem baixo consumo de energia, com isso dividir as atividades de roteamento entre

si, desta forma, seria possível balancear o consumo de energia da rede (COAN, 2012 *apud* MOREIRA, Antônio, 2014).

- **Quantidade de nós sensores:** A quantidade de sensores que uma rede contém está diretamente relacionado ao local que se deseja monitorar, para aplicações ambientais como, por exemplo, florestas e oceanos, são esperados que estas redes tenham entre 10 a 100 mil nós sensores. Levando isto em consideração, a escalabilidade se torna um elemento importante, tendo em vista que o melhor desempenho dos sistemas de sensoriamento ocorre quando os nós sensores são imóveis (estáticos).
- **Auto-organização das RSSFs:** Em uma RSSF, os sensores podem ser perdidos por algumas situações, como, a falta de energia ou a destruição física, além do que, devido a problemas no canal de comunicação sem fio, ou por decisão de algum algoritmo que gerência a rede, os sensores podem ficar incomunicáveis. Inclusive, o inverso pode acontecer, os sensores inativos podem se tornar ativos, ou novos sensores passam a fazer parte desta rede. Para qualquer que seja a situação dos sensores, ficarem inoperantes, ou um outro nó passar a fazer parte dessa rede, é de extrema necessidade que haja um mecanismo de auto-organização para que a rede continue a cumprir sua função. Portanto, essa configuração deve ser automática e regular, uma vez que, a configuração manual se torna inviável em virtude de problemas de escalabilidade.
- **Tarefas colaborativas:** As RSSF têm como objetivo primordial realizar tarefas colaborativamente, onde é fundamental detectar e estimar eventos relevantes, não apenas de fornecer mecanismos de comunicação. Geralmente, devido às limitações das RSSF, os dados são sumarizados para aperfeiçoar o desempenho no processo de localização de eventos.
- **Capacidade de responder a consultas:** Numa determinada consulta sobre uma informação coletada numa rede, ela pode ser reservada para um nó sensor individual ou um grupo de nós sensores. Conforme verificado, é levado em consideração o grau de sumarização praticado, e o mesmo poderá ser inviável para transmissão dos dados através da rede até a primeira ocorrência.

Desse modo, se faz necessário escolher múltiplos nós sorvedouros para suprir a alta demanda de consultas realizadas na rede (LOUREIRO, et al.,2003).

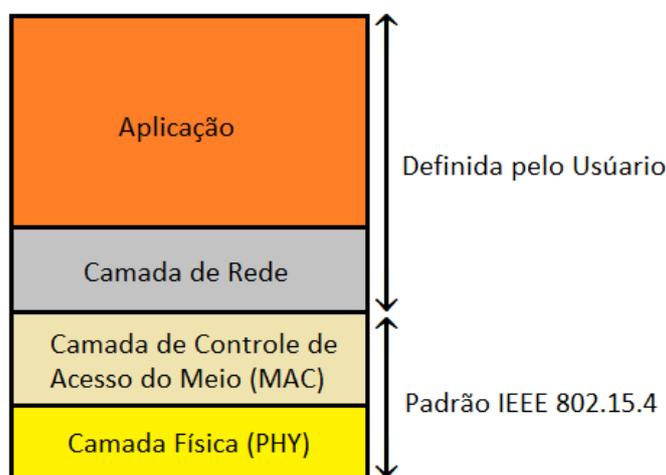
2.2 PADRÃO IEEE 802.15.4

A IEEE estabeleceu o padrão 802.15.4 em outubro de 2003. Para o desenvolvimento do padrão, objetivou-se a criação de sistemas de comunicação de baixo custo e consumo, para serem utilizados em equipamentos de sensoriamento e controle. Diferentemente do *WiFi* e *Bluetooth*, o 802.15.4 foi particularmente desenvolvido para uso em aplicações de baixas taxas de comunicação, que requerem baixo consumo de energia (IEEE 802.15.4, 2003).

O padrão IEEE 802.15.4, é o padrão adequado a ser utilizado nas RSSF, visto que possui baixa complexidade de implementação, baixa taxa de transmissão e tem a vantagem de utilizar o mecanismo de hibernação, que garante o baixo consumo de energia na ausência de transmissão (Oliveira, 2009).

Além disso, o padrão IEE 802.15.4 tornou-se um padrão de credibilidade e boa aceitação, bem reconhecido pelas empresas de tecnologia, e conseqüentemente, bem aceito pelos seus usuários. É um padrão cujos produtos são comercializados a um baixo custo. Além do mais, ele fornece especificações apenas para a camada física (*Physical - PHY*), também para a camada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control – MAC*), como é ilustrado na Figura 2 (CHEN et al., 2009 *apud* MOREIRA, Antônio, 2014).

Figura 2: Camadas de comunicação padrão IEEE 802.15.4



Fonte: (OLIVEIRA 2009).

Abaixo, algumas das principais características existente no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4, 2003):

- Taxa de transmissão de dados de 250kbps, 40 kbps e 20 kbps;
- Topologia estrela e ponto a ponto;
- Endereçamento de 16 bits ou 64 bits;
- Alocação de *slots* garantidos no tempo (*Guaranteed Time Slots - GTS*);
- Acesso ao canal implementado com *Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance (CSMA-CA)*;
- Baixo consumo de energia, (após a transmissão, os dispositivos entram em *stand-by*, reduzindo assim o consumo de energia);
- Detecção de energia (*ED – Energy Detection*);
- Indicação da qualidade de conexão (*Link Quality Indication - LQI*);
- 16 canais na banda de 2.4 Ghz, 10 na banda de 915 Mhz e 1 na banda 868 Mhz.

Além do que, deve ser levado em consideração no padrão IEEE 802.15.4 em uma RSSF, que ele não pode ser utilizado sozinho, tornando essencial a implementação de um protocolo de rede, que tem por sua vez a função de garantir a entrega das mensagens para os nós que encontram-se distantes uns dos outros (OLIVEIRA, 2009). Desse modo é imprescindível a escolha de um protocolo, a fim de que a comunicação na rede possua melhor performance possível.

2.2.1 Camadas do Padrão IEEE 802.15.4

Como foi apresentado anteriormente, o padrão IEEE 802.15.4 é definido por duas camadas de baixo nível, a camada de controle de acesso ao meio (MAC) e a física (PHY).

A camada de acesso ao meio (MAC) tem como função executar a comunicação entre cada nó da rede. Existem outras responsabilidades dessa camada, como o controle do acesso ao canal de rádio, fornece manutenção e sincronização da rede, além de mecanismos de gerenciamento e segurança dos dispositivos, disponibilizar uma comunicação confiável entre duas entidades (MOREIRA, Irlan, 2012). Outro papel importante da camada MAC é de editar os dados que serão recebidos pela

camada física, em seguida processá-los, e depois disso, encaminhá-los para a camada de rede. (IEEE 802.15.4, 2003).

Acerca do tráfego de dados na rede, é utilizado o método CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), a fim de evitar o uso simultâneo do canal por mais de um dispositivo em um mesmo instante, desse modo, o meio estando livre a mensagem será enviada, caso contrário, não haverá transmissão, pois, a ocorrência de uma transmissão causaria uma colisão. Por fim, o dispositivo espera um tempo, até que o canal esteja totalmente livre, para só assim enviar a mensagem desejada. Esse método se diferencia do CSMA/CD (*Collision Detection*), que no caso funciona quando a colisão já tem acontecido (BRONZATTI, 2013).

Quanto a camada física (PHY), ela é a camada no nível mais baixo, também é definida pela IEEE 802.15.4, é a responsável pela transmissão e recepção de dados usando um canal de rádio, definido segundo a modulação ou técnica de difusão. Definem-se dois tipos de camada (PHY) para a operação ISM (*industrial, Scientific and medical*), que se diferenciam pelo espectro de frequência de operação: uma na faixa de 2,4GHz, que é utilizada na maioria dos países, outra funciona em duas faixas de frequência, 868/915 MHz, sendo estas utilizadas na Europa, América do Norte, Austrália e Nova Zelândia (IEEE 802.15.4, 2003). O Quadro 1 demonstra algumas especificações da camada *PHY*.

Quadro 1: Especificações da camada PHY

Faixa de Frequência	Taxa máxima de Transmissão	Número de Canais	Modulação
2400 MHz	250kpbs	16	O-QPSK
868 MHz	40kpbs	1	BPSK
915 MHz	20kpbs	10	BPSK

2.2.2 Dispositivos para composição da rede (IEEE 802.15.4)

O padrão IEEE 802.15.4 possui dois tipos de dispositivos para a composição da rede, para funções completas, os dispositivos são chamados de FFDs (*Full Function Device*), ao mesmo tempo que os dispositivos com funções reduzidas são os RFDs (*Reduced Function Device*). Os dispositivos FFDs podem atuar de três

maneiras distintas, como um membro simples, um coordenador de rede pessoal ou somente coordenador, são utilizados para sensoriamento e/ ou escoamento de dados para um host ou outra rede; já os RFDs podem apenas se comunicar com o coordenador FFD e é sugerido para aplicações que sejam extremamente comuns, tais como sensores infravermelhos passivos, ou interruptores de luz, os quais não precisam transmitir um grande volume de dados, e que em alguns casos, estejam associados exclusivamente ao *FFD*. Assim sendo, o *RFD* pode ser implementado consumindo poucos recursos e pouca capacidade de memória (OLIVEIRA, 2009).

Uma RSSF deve necessariamente possuir, no mínimo, um dispositivo FFD e um, ou vários outros, dispositivo RFD. Ambos os dispositivos são formados pela camada de enlace (*MAC*) e camada física (*PHY*). E para o funcionalmente exato do padrão numa rede, é obrigatório existir um protocolo de rede que seja responsável pela garantia da entrega de mensagens para os nós mais afastados (OLIVEIRA, 2009).

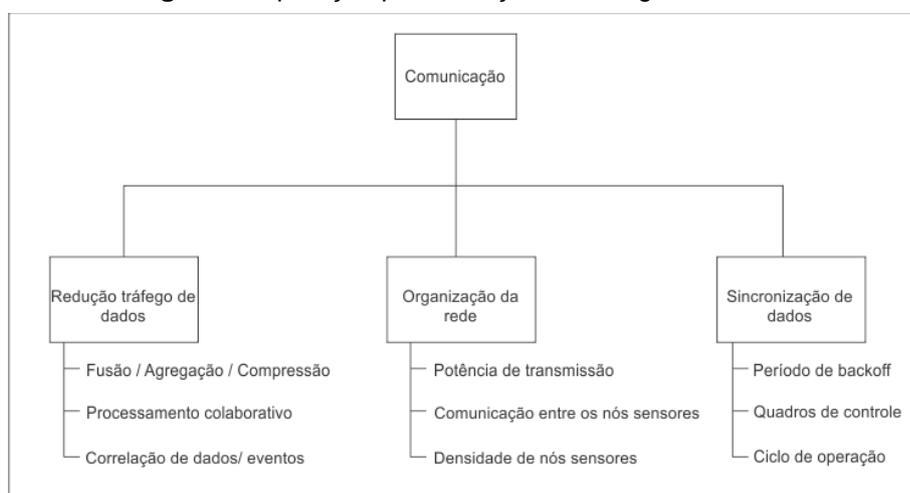
3. CONSUMO DE ENERGIA EM RSSF

Uma das grandes dificuldades para este tipo de rede está relacionado com o consumo de energia dos nós sensores, visto que estes são alimentados por fontes de energia limitada. Em aplicações ambientais, por exemplo, os sensores podem ser colocados em áreas remotas e de difícil acesso, dessa forma impossibilitando sua manutenção. No que se diz respeito, podemos mencionar a troca de baterias dos sensores, fazendo inevitavelmente, com que estas redes utilizem regras rigorosas de durabilidade de energia, tendo como exemplo, a redução do tempo em que o sensor permanece com seu rádio ligado, variando os estados em sensor ativo ou não. Assim sendo, no período ativo, o sensor permanece com seu rádio ligado, escutando e transmitindo na rede. E no período de inatividade, garantindo a redução de consumo de energia. Estes períodos de inatividade e atividade são chamados de *duty cycle*.

3.1 MÉTODOS DE ECONOMIA DE ENERGIA EM RSSF

O consumo de energia é um dos fatores relevantes para expandir a vida útil da RSSF, para esse fim, os projetos implementam métodos para economia na diminuição de comunicação de quadros enviados, na melhor organização da rede e no sincronismo de dados. Na Figura 3, (CORREIA et al., 2005), são classificados os métodos empregados para diminuição de energia gasta durante o processo de comunicação dos nós sensores.

Figura 3: Operação para redução de energia em RSSF



Fonte: (CORREIA et al., 2005)

A seguir são descritos métodos utilizados para a redução de energia despendida no decorrer do processo de comunicação dos nós:

3.1.1 Redução de tráfego de dados

A quantia de informações transmitidas ao coletor pode ser reduzida por meio dos métodos.

- **Fusão:** Os nós sensores, ao receberem informações de outros nós sensores da rede, fundem os mesmos aos seus dados e encaminham em um único pacote de dados.
- **Agregação:** O nó sensor obtém informação de seu vizinho e realiza um processamento desta informação, agregando a seus dados e encaminhando ao coletor, também reduzindo o tráfego da rede.
- **Compressão:** É o método onde o nó sensor se utiliza de algoritmos de compactação para diminuir os dados a serem transmitidos.
- **Processamento colaborativo:** Os nós sensores se ajustam afim de evitar que informações inválidas transitem na rede, este ajuste acontece através de calibração dos nós sensores na rede.
- **Correlação de dados:** Em redes onde muitos nós sensores próximos executam o mesmo monitoramento, pode haver a transmissão da mesma informação, observada por vários nós sensores, a correlação dos dados evita este tipo de informação redundante, por meio de supressão e filtragem de dados, para reduzir o tráfego.

A técnica de agregação e fusão dos dados de sensores é utilizada como forma de redução de energia consumida pela rede (AGNOLI et al., 2008).

3.1.2 Organização da rede

A topologia influencia na economia de energia despendida dos nós sensores, portanto:

- **Potência de transmissão:** a potência de transmissão dos rádios está relacionada ao alcance de transmissão dos mesmos, quanto maior a potência,

maior será o alcance e maior o consumo energético. Em (CHEN; YANG; YI, 2010) é tratada maximização da vida útil da RSSF através da organização da topologia da rede.

- **Comunicação entre os nós sensores:** a comunicação pode ser direta quando o nó sensor se comunica diretamente com a estação base, ou coletor, também chamada de *single-hop*, ou indireta, quando nós sensores comunicam-se entre si para alcançar o coletor, chamado de *multi-hop*.
- **Densidade de nós Sensores:** segundo (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000) quanto maior a densidade do número de nós sensores, maior será a precisão dos dados, obtêm-se melhor tolerância a falhas dos sistemas, porém, para (TILAK; ABU-GHAZALEH; HEINZELMAN, 2002), esse aumento de densidade contribui para taxas de colisões maiores.

3.1.3 Sincronização dos dados

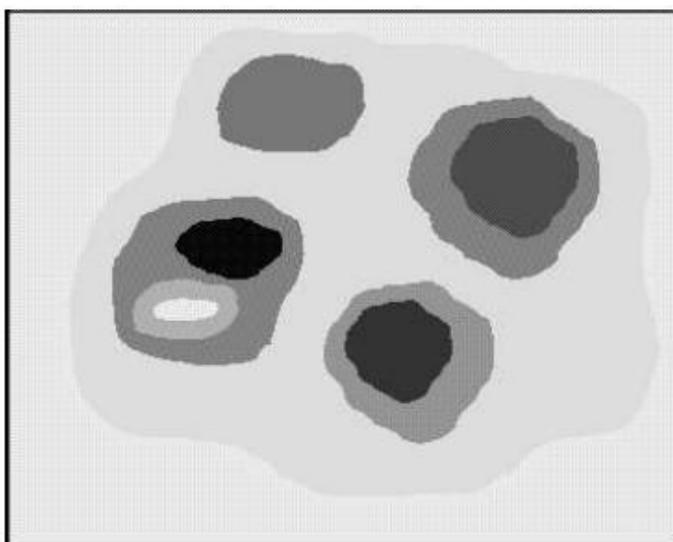
Métodos utilizados para evitar colisões na rede serão descritos abaixo.

- **Períodos de *backoff*:** É o período onde nós sensores detectam que há transmissões de outros nós sensores, há um período de espera, para que cada nó sensor transmitir e receber suas informações.
- **Quadro de controle:** Definem tempos para cada nó sensor transmitir e receber suas informações.
- **Ciclos de operação:** Os nós sensores alternam sua atividade em períodos de transmissão e estado de dormência, reduzindo assim o consumo de energia. Os autores (ZOU; LU, 2012) apresentam um método para a sincronização de tempo e as formas para alcançar esse sincronismo.

3.2 MAPAS DE ENERGIA DE UMA RSSF

Um meio de se conseguir informações sobre o nível de energia, em áreas onde os nós sensores são distribuídos, é por intermédio do Mapa de Energia. Particularmente, o mapa de energia serve como base de informação, permitindo detectar áreas que estão sujeitas a ficarem inativas. O estudo do mapa proporciona uma redistribuição de nós sensores em áreas as quais estão sujeitas a ter falhas, com isso, ajudando a possibilitar o prolongamento da vida útil da rede (LOUREIRO et al., 2003). Além disso, o mapa pode ser examinado para selecionar um melhor posicionamento para o *Cluster Head*. Movendo o nó sensor líder para áreas de maior concentração de energia, prolongando assim o tempo de vida da rede. Na Figura 4, está representado o mapa de energia por imagens em tons de cinza, no qual as áreas mais claras estão indicando maior energia disponível, e as áreas mais escuras, são as de baixa concentração de energia.

Figura 4: Mapa de energia de uma RSSF



Fonte: LOUREIRO (2003).

O consumo de energia no sensoriamento está vinculado a natureza da aplicação. Sensoriamento isolado (esporádico) deve utilizar menos energia que o monitoramento ininterrupto de eventos. A complexidade da detecção também representa um papel essencial na determinação do consumo de energia. Além de tudo, ambiente com ruídos causam erros consideráveis e aumentam a complexidade da detecção.

Em relação aos domínios, aquele no qual o nó consome mais energia é na comunicação de dados. Isso engloba recepção e transmissão de dados. O consumo de energia no processamento de dados é mínimo quando comparado à comunicação (POTTIE et al., 2000).

4. TÉCNICAS DE ROTEAMENTO EM RSSF – CLASSIFICAÇÃO

Roteamento em RSSF é uma tarefa crítica, pois ao contrário das tradicionais redes *ad-hoc*, roteamento em RSSF é mais desafiador devido a suas características específicas (Seah et al., 2010; Li et al., 2011).

- Primeiramente por causa dos recursos limitados em relação ao consumo de energia, processamento e largura de banda de transmissão.
- Segundo, é trabalhoso idealizar um plano de endereçamento global como protocolo de Internet (IP). Além do que, nas RSSF não pode ser aplicado o IP, uma vez que atualizar os endereços em larga proporção em uma RSSF dinâmica pode ocasionar sobrecarga.
- Em terceiro lugar, em virtude de recursos limitados, é difícil para o algoritmo de roteamento trabalhar com mudanças constantes e inesperadas da topologia de rede, principalmente em um contexto móvel.
- Com relação à coleta de dados por nós sensores, o protocolo de roteamento deve levar em consideração a grande probabilidade de redundância de dado que geralmente é resultante dessa coleta.
- Na maioria das aplicações de RSSF, requisitam um esquema em que a comunicação seja feita de múltiplas fontes para um particular nó sorvedouro (*sink*) que geralmente são nomeados de tipo muitos-para-um, ao contrário de multipercurso e par-a-par.

Levando em consideração a estrutura da rede, os protocolos de roteamentos das RSSF podem ser distribuídos em duas categorias, que são: Os roteamentos planos e hierárquico.

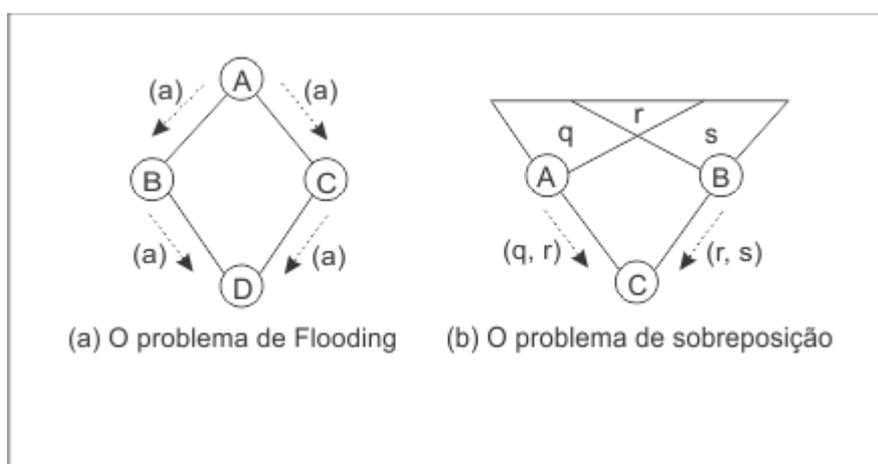
4.1 PROTOCOLOS PLANOS

Numa topologia plana, todos os nós sensores exercem a mesma tarefa e possuem as mesmas aplicabilidades na rede. Nesse roteamento, todos os nós executam as mesmas funções. Cada nó sensor é responsável por coletar dados e transmiti-los à estação base. Essa transmissão é executada salto a salto geralmente utilizando a forma de inundação. Os roteamentos típicos em RSSF incluem:

4.1.1 *Flooding* e *Gossiping*

Os dois protocolos usados por redes de sensores, sem a necessidade de algoritmos de roteamento e manutenção de topologia, são *Flooding* e *Gossiping*. Sendo que em *Flooding*, os nós sensores enviam seus dados para seus vizinhos, que por sua vez enviam adiante até que o processo alcance o coletor. Em contrapartida o *Gossiping* é uma variante um pouco melhorada do protocolo *Flooding*, em que o nó envia o pacote para um vizinho escolhido aleatoriamente, seleciona outro vizinho aleatório para transmitir o pacote assim, por diante, até chegar ao coletor (AKKAYA; YOUNIS, 2005). Apesar de que os protocolos sejam fáceis para implementar, ocorrem diversos inconvenientes, os quais serão mostrados na Figura 5, na Figura 5a, na qual o nó 'A' começa inundando seus dados para todos seus vizinhos, e o nó 'D' recebe duas cópias dos mesmos dados. Já na Figura 5b, há uma sobreposição da região sensoriada, como o *Flooding* não anuncia antes sua informação, pode acontecer do sensor 'C' receber duas vezes a mesma informação vinda dos sensores 'A' e 'B'. Novamente, este tipo de redundância origina um maior gasto de energia, tanto para enviar dado, quanto para receber. O protocolo *Gossiping* evita o problema de *Flooding* selecionando um nó aleatoriamente para envio, porém, causa atrasos na propagação dos dados através dos nós. (HEINZELMAN; KULIK; BALAKRISHNAN, 1999).

Figura 5: Deficiência de *Flooding* e *Gossiping*



Fonte: (HEINZELMAN et al. 1999)

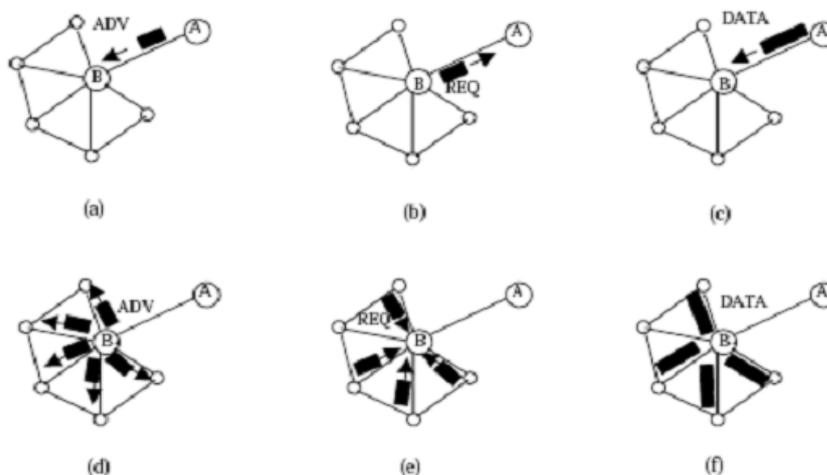
4.1.2 *Sensor Protocols of Information via Negotiation (SPIN)*

O SPIN tem como objetivo prevenir os problemas dos protocolos *Flooding* e *Gossiping* mencionados acima, através de negociação entre os nós sensores, de modo a garantir uma maior durabilidade da energia. O SPIN transmite uma mensagem aos nós vizinhos, que possuem dados para encaminhar, e os nós vizinhos que desejam receber a informação se pronunciam. Para esse fim, o protocolo utiliza metadados. Existem três tipos de mensagens básicas: de envio (ADV), de requisição, (REQ) e de dados (DATA).

- ADV: Primeiramente, o sensor transmite uma mensagem de aviso contendo um meta-dado (ou seja, um descritor de dados);
- REQ: Dessa forma, se o vizinho está interessado nos dados, ele envia uma mensagem de requisição;
- DATA: E somente então, os dados serão enviados, esse processo se repete até quando todos os nós sensores da rede que estejam interessados nos dados recebam uma cópia.

O protocolo SPIN tem suas vantagens, tais como (I) A resolução de problemas relacionado com os protocolos *Flooding* (Inundação), *Gossiping* e (II) as mudanças de topologia da rede são descobertas. Porém, existem também suas desvantagens, elas são, (I) escalabilidade, (II) se o coletor (destino) está interessado em vários eventos, isso fará com que os nós possam esgotar sua energia nas transmissões e por último (III), a técnica de propagação SPIN não garante a entrega de dados se os nós que estão interessados estiverem longe do nó sensor de origem, ou basta que entre os nós sensores, um deles não tenha interesse nos dados. A Figura 6, na página 35 é possível visualizar como é realizado a comunicação no protocolo SPIN.

Figura 6: Comunicação no Protocolo SPIN



Fonte: (AKKAYA E YOUNIS, 2005)

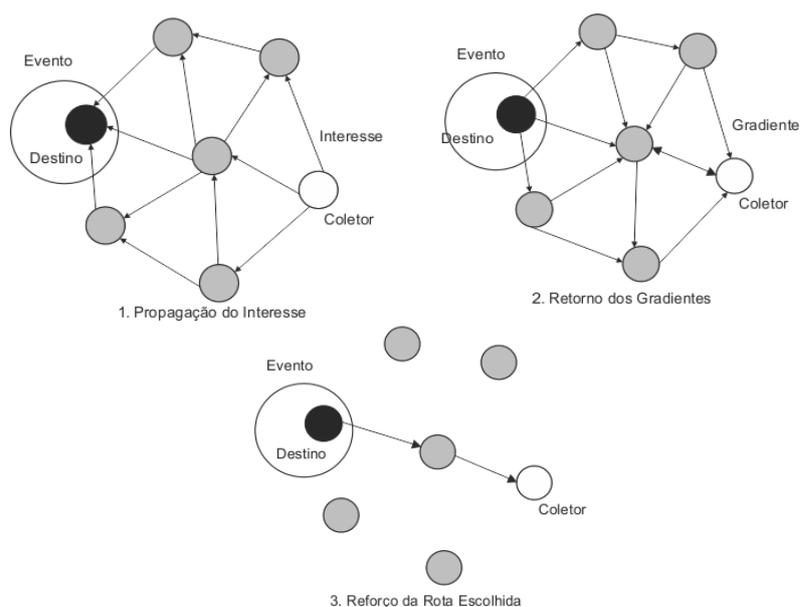
- (a) O nó “A” manda uma mensagem ADV com metadados
- (b) O nó “B” em seguida envia uma mensagem REQ demonstrando interesse
- (c) Logo em seguida os dados são enviados para o “B”
- (d) O nó “B” transmite aos demais nós que possui dados novos
- (e-f) E por último, os nós interessados fazem a requisição e recebem os dados logo em seguida.

4.1.3 Directed Diffusion (DD)

Difusão direcionada (*Directed Diffusion*) é um dos mais importantes protocolos de roteamento centrado em dados, ele utiliza a difusão de dados através dos nós sensores, no entanto, cria atributos a serem distribuídos com informações aos nós sensores interessados, com o propósito de impedir operações irrelevantes na camada de rede, dessa forma economizando energia. O protocolo propõe a criação de atributos a serem utilizados em consultas pelos sensores, tais como: nome dos objetos, área geográfica, duração e intervalo. Os dados são enviados para seus nós vizinhos, que podem fazer uso dessas informações para criar um cache para consulta caso interesse a cada nó. Na rede os nós sensores têm a capacidade de fazer agregação de dados. Os dados do cache são relacionados com valores de dados recebidos. E os dados contêm um campo chamado de gradiente, que é uma resposta à ligação de um nó vizinho de onde os dados foram recebidos.

Em Difusão Direcionada (DD), são possíveis caminhos alternativos, quando uma trajetória entre a fonte e o coletor falha, uma nova trajetória deve ser reconhecida, isso ocorre por meio de pesquisas reforçando outros caminhos, como é demonstrado na Figura 7 abaixo.

Figura 7: Fases do Protocolo DD



Fonte: (AKYILDIZ et al., 2002)

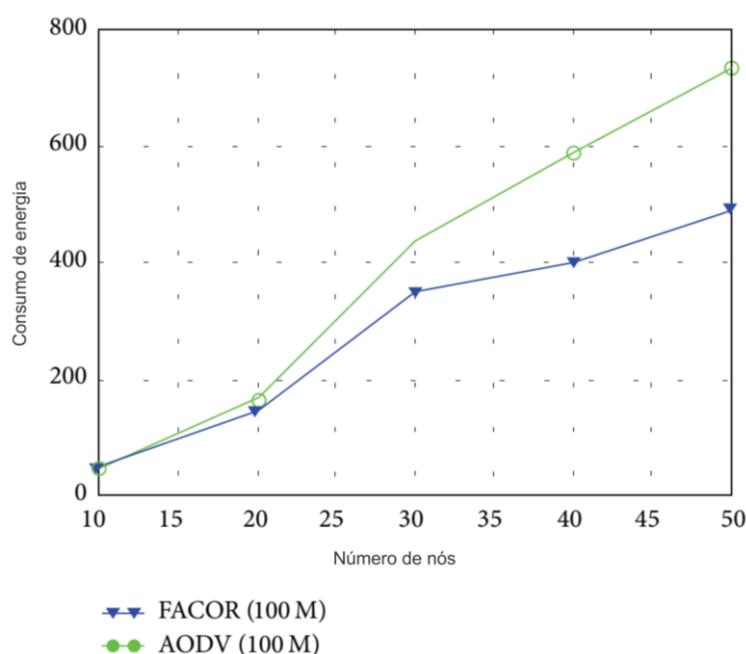
Entre os dois protocolos, DD e SPIN, existe diferença e está no mecanismo de consulta de dados sobre demanda. Em DD, o coletor consulta os nós sensores por meio de inundações para examinar se alguém está disponível. Já no SPIN, os nós sensores anunciam a disponibilidade de dados. Uma das vantagens do DD é que o protocolo é centrado em dados, a comunicação acontece vizinho a vizinho, dessa forma, não há necessidade de endereçamento de nó sensor, além do cache que é outra vantagem para economia de energia.

4.1.4 Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks Based on Fuzzy Ant Colony Optimization

Foi proposto um algoritmo de roteamento ótimo para RSSF inspirado pelo comportamento de forrageamento das formigas. As formigas tentam encontrar caminhos existentes entre a fonte e a estação base. Além disso, foi combinado este comportamento das formigas com a Lógica *Fuzzy*, para que as formigas façam a

melhor decisão. Em outras palavras, a Lógica *Fuzzy* é aplicada para fazer o uso desses caminhos ótimos. O algoritmo usa os princípios do *Fuzzy ant Colony Optimization Routing* (FACOR). O desempenho do algoritmo de roteamento proposto será demonstrado abaixo, levando em considerações as simulações realizadas na pesquisa de (Amiri et al., 2014), onde o mesmo foi validado utilizando a ferramenta *Network Simulator 2* (NS2), essa simulação foi feita comparando com o AODV. A Figura 8, demonstra que o algoritmo proposto, FACOR, tem melhor desempenho comparado ao AODV.

Figura 8: O consumo de energia (FACOR x AODV)



Fonte: (AMIRI et al., 2014)

Analisando a figura, os protocolos operam com o mesmo consumo de energia quando o número de nós é menor que 20. Mas quando o número de nós da rede aumenta, percebe-se que o consumo de energia no protocolo AODV cresce consideravelmente em relação ao FACOR. Para 50 nós, o protocolo sugerido consumiu aproximadamente 500J de energia, na mesma condição o AODV consumiu 700J. Nesta comparação, foi assumido um intervalo de transmissão de 100M e dois (2) hops, saltos de distância, entre o nó transmissor e o receptor (Amiri et al., 2014).

4.2 PROTOCOLOS HIERÁRQUICOS

Na topologia hierárquica, os nós sensores apresentam funções diferentes na RSSF, caracteristicamente, são organizados em muitos grupos de acordo com requisitos ou métricas específicas. Frequentemente, cada grupo tem um líder, chamado de “*Cluster Head*” (CH), e outros nós membros (MNs), os CHs podem ser organizados em outro nível hierárquico. Normalmente, os nós com alto nível de energia atuam como CH e desempenham a transmissão e processamento da informação, ao mesmo tempo que os nós com energia limitada atuam como MNs, fazendo sensoriamento da informação. Alguns algoritmos desta classe são apresentados abaixo.

4.2.1 *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH)

Entre os protocolos hierárquicos, o LEACH foi um dos primeiros e é um dos mais populares. A ideia consiste em formar grupos de sensores com base na potência do sinal recebido, utilizam *de* CH, que farão o processamento de agregação/fusão e transmissão dos dados para o coletor, funcionando como um tipo de roteador, dessa forma economizando energia dos demais. A probabilidade de um nó se tornar CH em uma rodada r é baseado no percentual P desejável de CHs, onde G representa o conjunto de nós que não foram CHs nas últimas $1/P$ rodadas é calculada pela equação 4.1 abaixo.

$$T(n) = \left\{ \frac{p}{1 - p^{*(r \bmod 1/p)}} \right\} \text{ se } n \in G, \text{ caso contrário} \quad (4.1)$$

Onde:

$T(n)$ probabilidade de um nó se tornar CH em r ;

P é percentual desejável de CHs;

$n \in G$ é o nó que pode ser candidato a CH em r .

O Protocolo LEACH, se comparado à comunicação direta, consegue reduzir em sete a quantidade de energia dissipada (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2002).

A comunicação entre os CHs e o coordenador pode ser feita de modo direto. Para isso, os CHs responsáveis pela comunicação têm que ser capazes de alcançar diretamente ao coordenador. Porém, isso pode provocar um problema se os nós da rede não possuírem potência de transmissão suficiente para que os CHs enviem os dados (AKKAYA; YOUNIS 2005; LOUREIRO et al. 2003). Na atualidade, existem nós que apresentam um longo alcance de transmissão e uma excelente sensibilidade de recepção, sem que isso represente um aumento considerável no consumo de energia do nó sensor (*ENGINEER LIVE* 2013; XBEE 2015).

4.2.2 Hierarchy Tree Routing Based on LEACH (HT-LEACH)

O HT-LEACH é uma versão modificada do LEACH, com a finalidade de garantir mais estabilidade. Para isso, assume-se que:

- Todos os nós sensores são alocados em um plano Bidimensional;
- Todos os nós são homogêneos e possuem energia limitada;
- Todos os nós são estacionários quando implantados no campo;
- Os nós são localizados;
- Todos os nós podem transmitir para a estação base;
- *Cluster Heads* agregam dados;
- Quando a energia é esgotada, os nós morrem.

Analisando o modelo energético de LEACH, o consumo de energia dos nós sensores normais derivam da coleta e transmissão de dados para os CHs. Já o consumo de energia no CH deriva principalmente da recepção de dados, fusão de dados e transmissão de dados para a Estação Base. Na qual a transmissão de dados do CH para BS consome uma grande porcentagem da energia.

Conforme Pal et al., (2012), foi melhorado o algoritmo LEACH através da construção de uma árvore de roteamento hierárquico entre os CHs. Dessa forma, foi redefinida a rodada em três fases, formação do cluster, que vai ser a mesma do cluster

LEACH, mas ao final desta fase os CHs não se juntam diretamente à estação base; formação da árvore hierárquica (AH) e estado estacionário.

Para validar o desempenho da rede, foram utilizados dois indicadores: o número de nós funcionando e o consumo energético total. O número de nós funcionando reflete o grau de saúde da rede atual. Se os nós mortos aumentam, os dados recebidos a partir da rede serão menos precisos. O consumo energético total reflete o tempo de vida da rede, menos consumo de energia significa um tempo de vida maior da rede. O Quadro 2, baseado nas figuras 6 e 7 de (ZHENSHAN et al., 2013), descreve a comparação em termos de consumo energético e tempo de vida dos nós entre os protocolos LEACH e HT-LEACH.

Quadro 2: Comparação entre o LEACH e HT-LEACH

Ciclos	Consumo de energia LEACH	Consumo de energia HT-LEACH	Nós vivos (LEACH)	Nós vivos (HT-LEACH)
1500	80%	67%	97	100
1750	89%	77%	68	99
2000	95%	90%	30	75

Conforme pode ser observado na tabela 2 acima, o protocolo HT-LEACH possui um melhor desempenho (ZHENSHAN et al., 2013).

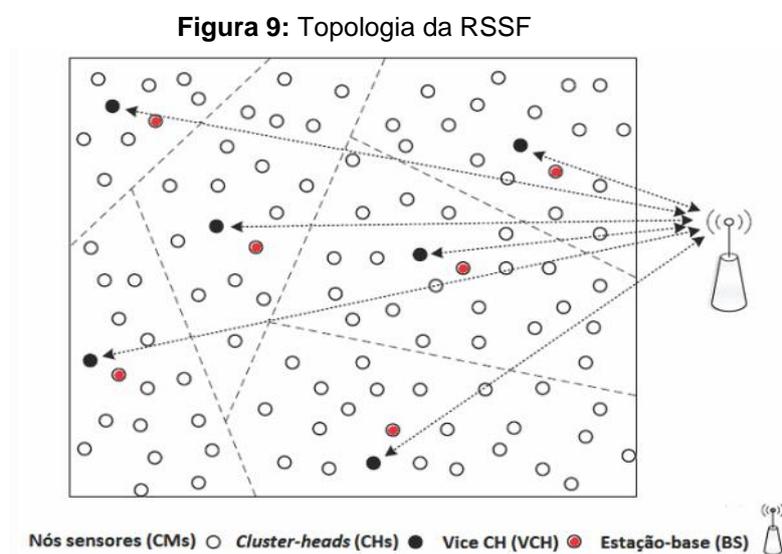
4.2.3 Fault-tolerant and Energy-efficient LEACH (FTE-LEACH)

Com o objetivo de satisfazer aos requisitos aguardados em RSSF industriais com muita densidade de nós, e que se localizem instaladas ao ar livre, foi desenvolvido o FTE-LEACH para redes que ficam em regiões onde não oferecem aos nós sensores uma fonte de energia permanente, o FTE-LEACH é um protocolo hierárquico e tem como características ser tolerante a falha, auto-organizável e energeticamente eficiente, que tem como princípio o LEACH, atuando no padrão IEEE 802.15.4 (OLIVEIRA, 2015).

No FTE-LEACH os nós sensores se organizam em *clusters*, onde uns dos nós atua como CH (*Cluster-head*) e um VCH (*Vice Cluster-head*), que adquire o lugar do CH, caso seja apresentado alguma falha de operação no CH. Todos os MNs devem

enviar seus dados ao CH, enquanto o CH, além de funcionar como nó sensor, deve receber os dados de todos os MNs, executar as funções de processamento de sinais, ou seja, agregação de dados, e enviar os dados até a BS. Em virtude das funções que executa, cada CH consome muita mais energia que os MNs. No cenário onde todos os nós têm recursos de energia escassos, se os CHs continuarem os mesmos, tal como ocorre em algoritmos de eleição estática de CHs, eles irão esgotar seus recursos energéticos drasticamente, dessa forma, todo o seu *cluster* ficará inoperante. A fim de evitar essa situação, o protocolo proposto, FTE-LEACH, realiza o rodízio dos CHs que dispõem de energia necessária para sua tarefa. Desta maneira, a carga energética requerida pelos CHs é uniformemente distribuída ao longo dos nós da RSSF (OLIVEIRA, 2015).

O FTE-LEACH é um protocolo idealizado para operar numa RSSF industrial de médio e grande porte, contendo duas entidades principais: O coordenador PAN (podendo ser chamado de Estação-Base - BS), os CHs e os Vice-CHs, que assumirão o lugar do CHs em caso de falha, e os nós sensores. A Figura 9 abaixo, mostra a topologia da rede.



Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

No FTE-LEACH, o cálculo do limiar $T(n)$ foi desenvolvido tendo como base a melhoria apresentada pelo protocolo de roteamento hierárquico HEED (YOUNIS; FAHMY 2004). O protocolo HEED contribuiu como base para alguns protocolos de roteamento que propuserem melhoria no procedimento de escolha de CH realizada

no LEACH (BHATTACHARJEE; BHALLAMUDI; MAQBOOL 2013; RENUGADEVI; SUMITHRA 2013 *apud* OLIVEIRA, 2015) equação 4.2:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod 1/p)} x \frac{E_i}{E_0} & \text{se } n \in G, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (4.2)$$

Onde:

$T(n)$ probabilidade de um nó se tornar CH em r ;

P é o percentual desejável de CHs;

E_i é a energia atual do nó i ;

E_0 é a energia inicial do nó i ;

r é a rodada atual;

$n \in G$ é o nó que pode ser candidato a CH em r .

Logo, acrescentando-se o cálculo do $T(n)$ desenvolvido pelo LEACH com a (equação 4.1) do $T(n)$ do HEED (equação 4.2), e adicionando-se uma compensação para a perda linear média da energia dos nós, obtêm-se (equação 4.3):

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod 1/p)} x \frac{E_i}{E_0} x \frac{1}{1 - (fl)xr} & \text{se } n \in G, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (4.3)$$

Onde:

f é o fator de dissipação energética/nó/bit em r ;

l é a quantidade de bits transmitida por nó em cada rodada.

Na equação acima, G representa o conjunto de nós que não foram CHs nas últimas $1/P$ rodadas, E_i e E_0 são as energias atual e inicial (média) do nó, o f é denominado de fator de dissipação energética por nó, para transmitir l bits em cada rodada r . Esse fator de dissipação energética f pode variar em relação da topologia e da quantidade de nós da RSSF.

Para descobrir o valor de p , (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHANAN, 2002 *apud* OLIVEIRA 2015) executaram testes experimentais e atingiram o percentual esperado de CH por rodada de 5% ($p=5\%$).

Sendo assim, se uma RSSF possui 200 nós ($N=200$), o número esperado de 10 CHs ($k_{ótimo}$) a cada rodada (equação 4.4):

$$k_{ótimo} = \sum_{i=1}^N P \times 1 \quad (4.4)$$

As simulações foram realizadas no Matlab, a qual foi empregada uma distribuição aleatória de 50, 100 e 200 nós em três cenários de 100m x 100m, respectivamente. A BS foi implantada a 75m do cenário (fora dos limites do mesmo), na localização $x=50$ e $y=175$, conforme mostrado na figura 9. A largura de banda do canal é de 250 Kbps, com os atrasos de transmissão em 25 μ s. Os nós sensores dispõem de um pacote de 33 bytes de comprimento (31 bytes de cabeçalho no padrão (IEEE 802.15.4 2012) + 2 bytes de dados leitura dos sensores). A rede é heterogênea, com os nós sensores (todos do tipo FFD) variando sua energia inicial em $\pm 10\%$. No Quadro 3 é possível visualizar os parâmetros utilizados nas simulações.

Quadro 3: Dados para simulações

Número de nós (N)	50, 100 e 200
Dimensões dos cenários (M)	100m x 100m
Localização da BS	75m (50, 175)
Atraso (T_x e R_x)	50 μ s
Taxa de transmissão	250 kbps
Tamanho do pacote	31 bytes
Potência mínima necessária para recepção de um pacote ($P_{r-thresh}$)	6,3nW
Energia do circuito do transceptor (E_{elec})	100nJ/bit
Limiar da distância entre Tx e Rx (d_0)	227m
Energia de Tx a curtas distâncias $E_{friss-amp}$	225pJ/bit/m ²
Energia de Tx a longas distâncias $E_{two-ray-amp}$	0,005 pJ/bit/m ⁴
Energia para agregação de dados (E_{da})	5 nJ/bit
Energia inicial do nó	Variável, dependendo do cenário. Todos os nós começam com energia desigual (rede heterogênea), com uma variação de $\pm 10\%$
Percentual de CHs desejável por rodada ($k_{ótimo}$)	5%

Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

Levando em consideração os dados da tabela acima, foram utilizados para mensurar a quantidade de nós sem energia nas redes com 50, 100 e 200 nós, cujo o propósito é determinar a eficiência dos protocolos face a pouca energia disponível. Quanto mais depressa os nós sensores esgotarem sua energia, menor o tempo de vida da rede.

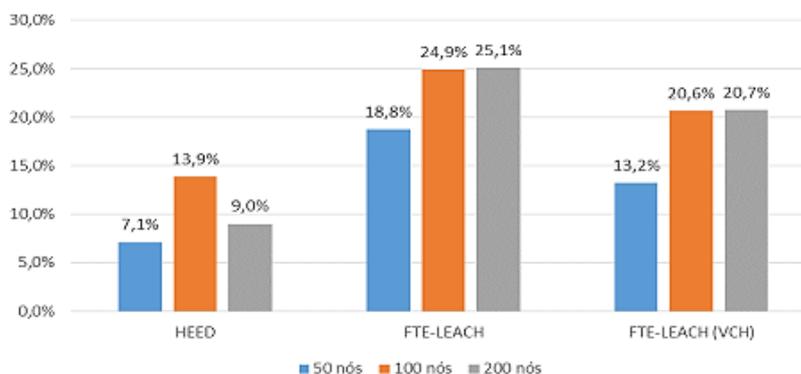
Em um cenário com 50 nós, o protocolo LEACH, nas condições de pouca energia total da rede, foi registrado 18% a mais de nós sem energia em relação ao FTE-LEACH sem o uso do VCH, já no FTE-LEACH com o uso do VCH, registrou 13% a mais de nós sem energia. O HEED obteve 7% de vantagem no número de nós mortos em comparação ao LEACH.

Com 100 nós, houve 21% mais nós, sem energia no LEACH quando comparado ao FTE-LEACH com VCH, esse valor sobe para 25% quando comparado ao FTE-LEACH sem o esquema tolerante a falhas implantado. O HEED teve 14% menos nós perdidos se comparado ao LEACH.

Quando o cenário é configurado com 200 nós registrou valores próximos à descrita no cenário de 100 nós, com uma particularidade, a piora de 5% do HEED no número de nós ativos em comparação ao cenário anterior.

Observa-se, dessa forma, que o FTE-LEACH sem VCH obteve uma vantagem média em número de nós ativos de 23% em relação ao LEACH, e 6% menos quando na existência do VCH. A razão desta piora é que a rede perde mais energia quando o VCH precisa enviar informações em caso de falha do CH, mas esse acréscimo no consumo de energia quando o esquema tolerante a falhas é implantado no FTE_LEACH é compensado pelo envio de um maior conjunto de dados à BS, e mantendo os *clusters* funcionais por mais tempo, aumentando os requisitos de confiabilidade e disponibilidade da RSSF. O gráfico da figura 10 na página 45, retrata os resultados anteriormente discutidos (OLIVEIRA, 2015)

Figura 10: Percentual médio de melhoria na quantidade de nós sem energia do HEED, FTE-LEACH e FTE-LEACH com VCH em comparação ao LEACH



Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

4.2.4 Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS)

O PEGASIS é um protocolo que se baseia no LEACH. Mas ao contrário de formar diversos *clusters*, o PEGASIS forma cadeias de nós sensores onde cada nó sensor envia e recebe de um vizinho, somente um nó sensor eleito dessa cadeia transmite para o coletor. A informação coletada move-se de nó em nó, sendo ocasionalmente agregada e enfim enviada para o coletor (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002).

Assim sendo, o número de trocas de mensagens será baixo e a comunicação acontecerá entre nós próximos uns dos outros. Dessa forma, a expectativa é que a energia dissipada seja menor, se comparada a outros protocolos que solicitam muitas trocas de mensagens para escolher os líderes e formar grupos, e protocolos em que os nós regularmente trocam mensagens com o nó gateway de modo direto, levando em consideração que o gateway geralmente encontra-se distante dos nós. Foi apresentado que o PEGASIS é capaz de proporcionar um desempenho de 100% a 300% melhor sobre o LEACH, levando em consideração o tamanho da rede e da topologia da rede. Tal ganho de desempenho é obtida por meio da eliminação da sobrecarga causada pela formação dinâmica de *clusters*, através da redução de transmissões com a implementação da agregação de dados. Porém, o PEGASIS apresenta um atraso excessivo para nós distantes da cadeia, como também a existência de um único líder, o que pode se tornar um obstáculo (AKKAYA e YOUNIS, 2005).

4.2.5 Biogeography-Based Optimization (BBO)

A eficiência energética em RSSF é um dos mais importantes indicadores de desempenho. A rede de sensores é um sistema distribuído baseado em eventos que difere das redes tradicionais. Consistem de nós sensores com limitada potência de bateria e comunicações sem fio são implementadas para coletar informações úteis da área. Desse modo, foi proposto o BBO, que é implementado juntamente com o PEGASIS para se conseguir a mais curta cadeia para cada rodada e conseqüentemente, mais eficiência energeticamente (BIPANDEEP SINGH et al., 2014).

Como o nome sugere, BBO é uma técnica de otimização global baseada em população desenvolvida com base na ciência de biogeografia, isto é, estudo da distribuição de animais e plantas entre diferentes habitats no tempo e espaço (SIMON et al., 2009). O resultado do BBO apresenta melhoria quando comparadas com outras técnicas de otimização, como Otimização da Colônia de Formigas, Otimização por Enxame de Partículas, Algoritmo Genético e Arrefecimento Simulado. A metodologia usada no PEG-BBO para melhoria energética é descrita nos passos a seguir:

- **Passo 1:** Inicializar o parâmetro de RSSF;
- **Passo 2:** Implantar o número de nós;
- **Passo 3:** Implementar o protocolo PEGASIS;
- **Passo 4:** Iniciar o parâmetro BBO para o roteamento;
- **Passo 5:** Definir a taxa de Migração e Emigração;
- **Passo 6:** Atualização de roteamento em cada rodada;
- **Passo 7:** Verificar tempo de vida e consumo de dados;
- **Passo 8:** Comparação com outros métodos.

No Quadro 4, baseada nas figuras 5 e 6 de (BIPANDEEP SINGH et al., 2014) na página 47, está descrita a comparação, em termos de nós vivos, ao longo do tempo e quantidade de dados enviados ao longo do tempo entre os protocolos PEGASIS e PEG-BBO.

Quadro 4: Comparação entre o PEGASIS e PEG-BBO

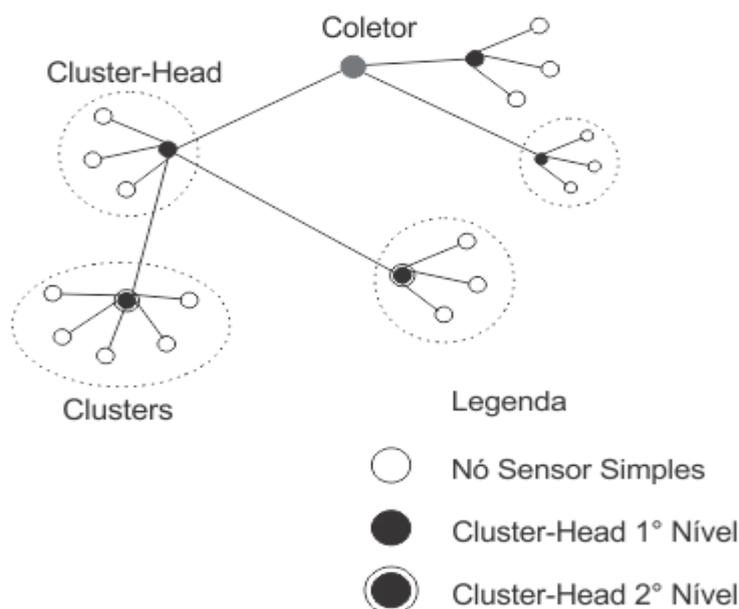
Ciclos	Nós vivos PEGASIS	Nós vivos PEG-BBO	Quantidade de dados enviados PEGASIS (x10⁴)	Quantidade de dados enviados PEG-BBO (x10⁴)
1500	65%	98%	1,5	7
1750	35%	80%	2	8
2000	15%	50%	2,5	9

O protocolo de roteamento usando o BBO é apresentado para construir a cadeia do protocolo PEGASIS. O BBO adota um método mais aceitável para construir a cadeia e manter o consumo de energia em equilíbrio, para em seguida prolongar o tempo de vida da RSSF. Os resultados mostram que o PEG-BBO dá maior eficiência energética e estende o tempo de vida da rede (BIPANDEEP SINGH et al., 2014).

4.2.6 Threshold Sensitive Energy Efficient Network (TEEN)

Este algoritmo de roteamento hierárquico é projetado para ser sensível a mudanças bruscas (inesperadas) nas características observadas, como por exemplo, temperatura. Em aplicações críticas, a garantia de entrega de dados é essencial, o protocolo TEEN utiliza a abordagem hierárquica, com uso de mecanismo de dados centralizados. A sua arquitetura se baseia em *clusters* hierárquicos, no qual os nós formam estes *clusters*, onde cada um tem um *cluster-head* que é encarregado de transmitir até o coletor, os restantes formam o segundo nível, na Figura 11 da página 48, está representada a arquitetura (AKYILDIZ et al., 2002).

Figura 11: Arquitetura TEEN



Fonte: (AKYILDIZ et al., 2002).

Logo após os clusters serem formados, são transmitidos dois limites para os nós sensores pelo *cluster-head*, esses limites são rígidos e suaves para atributos de sensoriamento. O limite rígido é o valor mínimo aceitável de um atributo para que um nó sensor ative o seu transmissor e transmita ao *cluster-head*. Dessa forma, somente será transmitido quando o atributo for percebido, diminuindo o número de transmissões. Assim sendo quando um nó sensor encontrar o valor igual, ou superior, ao limite rígido, e o valor for igual, ou superior ao limite suave, estes dados serão transmitidos. Esses valores podem ser ajustados com a finalidade de administrar o número de transmissões. Logo, o TEEN, para aplicações que necessitam de relatórios periódicos não é um bom protocolo, visto que os valores rígidos ou suaves podem não ser atingidos.

4.2.7 The Adaptive Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (APTEEN)

O protocolo APTEEN é uma extensão para TEEN e destina-se à captura de coletas periódicas, como também para acontecimentos críticos. Com relação à arquitetura, é a mesma do protocolo TEEN. Quando os *clusters* são formados pelo coletor, são enviados os valores limites e o horário de transmissão para os nós

sensores e o responsável desse envio é o *cluster-head*. Com a finalidade de economizar energia o *cluster-head* realiza processamento de agregação de dados (AKYILDIZ et al., 2002). O protocolo APTEEN permite três tipos de consultas, que são:

- Tempo: para verificação instantânea da rede
- Persistente: para monitorar um evento em um período de tempo
- Histórica: para análise de valores antigos

Em relação ao desempenho, o protocolo APTEEN está entre LEACH e TEEN em termos de dissipação de energia e vida útil da rede. O TEEN oferece o melhor desempenho, uma vez que diminui o número de transmissões. As principais desvantagens do protocolo TEEN e do APTEEN são a sobrecarga, e complexidade, da formação de *clusters* em vários níveis, a implementação de funções para atribuir os limites para transmissão dos dados.

5. VANTAGENS E OBJETIVOS DO AGRUPAMENTO

5.1 VANTAGENS E OBJETIVOS

Com relação aos protocolos de roteamento planos em RSSF, os protocolos de roteamento por agrupamento apresentam diversas vantagens, como escalabilidade, menor carga, menor consumo de energia e maior robustez. Neste item, serão mostradas as suas vantagens, assim como os objetivos do agrupamento em RSSF.

- **Escalabilidade:** Em roteamento por agrupamento, os nós sensores são fracionados em uma variedade de grupos com níveis diferentes de atribuição. Os *Clusters head* são encarregados pela agregação de dados, gerenciamento da rede e disseminação de atribuição, e os nós membros pelo sensoriamento dos eventos e coleta da informação do ambiente. Comparado à topologia plana, esse padrão de topologia de rede é simples de administrar, e mais escalável para responder eventos no ambiente (Seah et al., 2010).
- **Fusão de Dados:** É a técnica de agregação de dados de múltiplos nós, com intuito de excluir transmissões redundantes e fornecer dados reunidos para a “Base Station” (BS), dessa forma, sendo eficaz para minimizar o consumo de energia na RSSF (Rajagopalan et al., 2006). A estratégia mais conhecida de fusão de dados é a agregação por agrupamento, onde cada CH agrega os dados coletados pelos MNs e enviam para a BS (Yue et al., 2012). Normalmente os CHs formam uma estrutura de árvore para transmitir os dados agregados por saltos múltiplos, por intermédio de outros CHs, o que resulta em uma economia considerável de energia (Ozdemir et al., 2009).
- **Menor Carga:** Já que os nós sensores geram dados substancialmente redundantes, a agregação de dados surgiu como sendo um princípio e objetivo importante em RSSF. A principal finalidade da fusão de dados é combinar dados de fontes distintas, com o intuito de excluir transmissões redundantes, e assim proporcionar uma visualização rica e multidimensional do que está sendo monitorado (Li et al., 2011; Seah et al., 2010). Vários métodos de roteamento com capacidade de agregação de dados requisitam uma seleção criteriosa para a abordagem de agrupamento. Na topologia de agrupamento, todos integrantes do grupo enviam dados para o CH, e a agregação dos dados é

executada nos CHs, o que auxilia a diminuir rapidamente a transmissão de dados, e conseqüentemente, economizando energia. Além do que, as rotas são configuradas dentro de cada grupo, com isso, o tamanho da tabela de roteamento armazenada nos nós sensores individuais é reduzido (Abbasi et al., 2007; Akkaya et al., 2005).

- **Menor Consumo de Energia:** No esquema de roteamento por agrupamento, a fusão de dados auxilia a reduzir as transmissões de dados, e como resultado, vem a economia de energia. Além do mais, agrupamento com comunicação intragrupo e intergrupo pode diminuir o número de nós sensores executando a tarefa de comunicação à longa distâncias, desse modo, proporcionando menor consumo de energia para toda a rede. Portanto, somente CHs tem a função de transmitir os dados no esquema de roteamento por agrupamento, o que pode poupar grande quantia de energia.
- **Maior Robustez:** O método de agrupamento é mais útil para o controle da topologia e para atender a mudanças relacionadas ao aumento de sensores, flexibilidade dos nós e falhas inesperadas. Numa estratégia de roteamento por agrupamento, é preciso lidar com essas mudanças dentro de cada grupo individualmente, desta maneira, a rede completa é mais robusta e mais gerenciável. A fim de compartilhar as responsabilidades, os CHs são frequentemente alternados entre todos os nós sensores para impedir um único ponto de falha em algoritmos de roteamento por agrupamento.
- **Anticolisão:** No padrão plano de múltiplos saltos, o meio sem fio é gerenciado e compartilhado por intermédio de nós individuais, gerando assim elevadas taxas de colisão de pacotes, ocasionando baixa eficiência nos recursos usados. No entanto, no modelo de agrupamento de múltiplos saltos, uma RSSF é distribuída em grupos, e a comunicação compreende duas estratégias, intragrupo e intergrupo, nessa ordem, para coleta de dados e para transmissão de dados. Para cada grupo reduzir a colisão entre eles, os recursos podem ser alocados ortogonalmente para cada um dos grupos (LEE et al., 2011). Como consequência, o modelo de agrupamento de saltos múltiplos é apropriado para RSSF de larga escala.
- **Redução de Latência:** No momento em que uma RSSF é dividida em grupos, somente os CHs realizam função de transmissão de dados para fora do grupo. Esse modo de transmissão de dados para fora do grupo auxilia a prevenir a

colisão de pacotes entre os nós sensores. Como resultado, a latência é reduzida. Além do mais, nos esquemas planos, as transmissões são realizadas salto a salto e geralmente usando o formato de inundação, entretanto, apenas os CHs realiza a tarefa de transmissão no método de roteamento por agrupamento, o que reduz a quantidade de saltos da fonte de dados até a estação base (BS), minimizando a latência.

- **Balanceamento de Carga:** É fundamental para ampliar o tempo de vida da rede em RSSF. Para grupos onde o CH executa a tarefa de processamento e gerenciamento intragrupo, a distribuição uniforme entre os nós sensores em cada grupo é geralmente considerada. Habitualmente, a construção dos grupos de dimensões iguais é adotada para prolongar o tempo de vida da rede, uma vez que previne o esgotamento prematuro de energia dos CHs. Além do que, roteamento por múltiplos percursos ser um método para balanceamento de carga.
- **Tolerância a Falhas:** Em virtude da aplicabilidade de RSSF em um número de cenário dinâmicos, os nós sensores podem sofrer de esgotamento de energia, erro de transmissão, funcionamento defeituoso de hardware, ataques maliciosos e outras coisas mais. Tolerância à falha é um desafio importante em RSSF (CHITNIS et al., 2009). Para impedir a perda considerável de dados de nós sensores chaves, os CHs têm que ser tolerantes a falhas, tornando essencial o projeto de abordagens permanente para tolerância a falhas. A técnica mais intuitiva para a recuperação de um grupo defeituoso é o reagrupamento, apesar de geralmente desarranjar a operação que esteja acontecendo.
- **Garantia de Conectividade:** Geralmente, os nós sensores enviam dados para uma ou mais BS por meio de salto único, ou múltiplos em RSSF, por isso, a conectividade de cada nó sensor no decorrer do caminho até a BS é o fator decisivo para a entrega dos dados. Além do mais, os nós sensores que não podem se comunicar com outro nó, serão isolados, seus dados não podem ser transmitidos para a BS. Logo, garantir assegurar a conectividade é um propósito essencial para protocolos de roteamento em RSSF (SEAH et al., 2010; LI et al., 2011). Um exemplo relevante é quando alguma informação a respeito de todos os nós sensores, se faz necessária à coleta por determinado

nó de fusão em protocolos de roteamento por agrupamento (FRERIS et al., 2010).

- **Evitar Buraco de Energia:** Geralmente, o roteamento de múltiplos saltos é usado para entregar o dado coletado para o nó sorvedouro ou para a BS. Nessas redes, o tráfego de dados de cada nó inclui o tráfego autogerado e o de retransmissões. Independentemente do protocolo MAC, os nós sensores vizinhos da BS têm que transmitir mais pacotes do que aqueles mais afastados da BS (LI et al., 2007). Conseqüentemente, os nós vizinhos da BS descarregam primeiro, levando a um buraco próximo a BS, separando a rede inteira, impedindo que os nós sensores enviem informações para BS, enquanto os muitos nós restantes ainda possuem bastante energia. Esse acontecimento é conhecido como buraco de energia (TRAN-QUANG et al., 2010). Os mecanismos para evitar o buraco de energia podem ser classificados em três grupos: deposição de nós, balanceamento de carga e mapeamento de energia (ISHMANOV et al., 2011). Em especial, agrupamento desigual é um dos métodos de balanceamento de carga. Nesse método, um grupo de raio menor, próximo ao sorvedouro, e um grupo de raio maior, longe do sorvedouro, são definidos respectivamente, logo, o consumo de energia no processamento de dados intergrupo é menor para grupos com raio menor, assim sendo, mais energia pode ser usada para retransmitir os dados dos nós remotos (LI et al., 2011).
- **Maximizando o Tempo de Vida da Rede:** O tempo de vida da rede é uma consideração inevitável em RSSF, pois a energia dos nós sensores são limitadas em relação a capacidade de processamento e banda de transmissão, principalmente em ambientes hostis. É imprescindível minimizar a energia consumida na comunicação intragrupo por meio dos CHs pois estes são ricos em recursos energéticos. Além do mais, os nós sensores que estão mais próximos da maioria dos nós sensores devem ser dispostos a serem CHs. Adicionalmente, com a finalidade de economizar energia, uma boa abordagem é selecionar rotas que possam prolongar o tempo de vida na rede intergrupo, e rotas compostas por nós com mais recursos energéticos devem ser favoritas.
- **Qualidade de Serviço:** Em RSSF as aplicações e funcionalidade necessitam de Qualidade de Serviço (QoS). Normalmente, amostra eficaz, menor atraso e precisão temporal são necessárias. É trabalhoso para todos os protocolos de

roteamento satisfazer todos os requisitos de QoS, visto que algumas demandas podem violar um ou mais dos princípios do protocolo. Abordagens existentes de agrupamento em RSSF são basicamente focadas no aumento de eficiência energética ao invés das métricas convencionais de QoS. Métricas de QoS devem ser levadas em consideração em muitas aplicações de tempo real.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os algoritmos de roteamento para RSSF foram objetivos de pesquisas pela comunidade acadêmica no decorrer dos últimos anos. Sendo que cada um dos protocolos desenvolvidos atende a uma determinada utilidade. Nesse trabalho foram abordadas as RSSF, sua arquitetura e fatores que influenciam as operações utilizadas para economia de energia em uma rede de sensores como, por exemplo, sincronização de dados e agregação de dados. No que se refere aos protocolos de roteamento RSSF, foram demonstradas pesquisas que classificam estes protocolos em Protocolos Planos ou Hierárquicos. Na tabela 5, adaptada de (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004), estão descritos os protocolos e suas categorias.

Tabela 5: Classificação dos protocolos de roteamento para RSSF. Adaptado de (PAZZI; ARAUJO; BOUKERCHE, 2004)

Protocolo de Roteamento	Centrado em Dados (Planos)	Hierárquico
<i>Flooding</i>	x	
<i>Gossiping</i>	x	
SPIN	x	
<i>Directed Diffusion</i>	x	
FACOR	x	
LEACH		x
HT-LEACH		x
FTE-LEACH		x
PEGASIS		x
PEG-BBO		x
TEEN		x
APTEEN		x

Os protocolos onde os nós sensores não são identificados por seus endereços na rede, mas sim pelos dados dos eventos observados, são chamados de protocolos centrados em dados. Já os protocolos de roteamento hierárquicos têm como objetivo manter a eficiência energética dos nós sensores, através de comunicação *multi-hop*

dentro de um grupo particular (*cluster*), realizar agregação e fusão dos dados, a fim de diminuir o número de mensagens transmitidas para o coletor.

Todos os protocolos analisados atendem a uma necessidade específica para a qual foram implementados; as vezes a tolerância à falha, outras à economia de energia. E em relação a eficiência energética aplicada a RSSF, entre os protocolos estudados, aqueles que mais atendem a esse quesito são os hierárquicos, onde são apresentadas várias vantagens em relação aos protocolos planos, como escalabilidade, menor carga, menor consumo de energia e maior robustez.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho de revisão da literatura acerca dos protocolos de roteamento em RSSF energeticamente eficientes, abre um leque de possibilidades para novas pesquisas, incluindo:

- Melhoria no desempenho dos principais protocolos de roteamento apresentados neste trabalho, visando a economia de energia;
- Simulação de todos os protocolos acima estudados em um ambiente padronizado, com vistas a checar, de fato, qual dos protocolos apresenta melhores resultados e;
- Implementação desses novos protocolos em sistemas embarcados de RSSF, para atestar o seu funcionamento na prática.

REFERÊNCIAS

- A. BASHARAT, N. CATBAS, M. SHAH, “**A Framework for Intelligent Sensor Network with Video Camera for Structural Health Monitoring of Bridges,**” In Proc. 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), Hawaii, 2005, pp. 385-389.
- ABBASI, A. A.; YOUNIS, M. (2007), **A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks.** *Comput. Commun.* 2007, 30, 2826–2841.
- AGNOLI, A. et al. (2008), **Sensor fusion and estimation strategies for data traffic reduction in ro oted wireless sensor networks.** In: IEEE. *Communications, Control and Signal Processing, 2008. ISCCSP 2008. 3rd International Symposium on.* [S.l.], 2008. p. 677–682.
- AKKAYA, K.; YOUNIS, M. (2005), **A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks** Elsevier Ad Hoc Network Journal, vol. 3, no. 3, pag. 325349, 2005. Disponível em:http://www.cs.umbc.edu/~kemal1/mypapers/Akkaya_Younis_JoAdHocRevised.pdf
- AKKAYA, K.; YOUNIS, M. (2005), **A survey on routing protocols for wireless sensor networks.** *Ad hoc networks*, Elsevier, v. 3, n. 3, p. 325–349, 2005.
- AKYILDIZ, I. et al. **A survey on sensor networks.** *Communications Magazine*, IEEE, v. 40, n. 8, p. 102–114, 2002.
- ALPER K, ISMAIL E, SEDAT A, SULEYMAN C, **Effects of transmit-based and receive-based slot allocation strategies on energy efficiency** in WSN MACs, Ad Hoc Networks, Volume 13, Part B, February 2014, Pages 404-413, ISSN 1570-8705.
- AMIRI, E; KESHAVARZ, H; ALIZADEH, M; ZAMANI, M AND KHODADADI, T. **Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks Based on Fuzzy Ant Colony Optimization** in International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014.
- BHATTACHARJEE, A.; BHALLAMUDI, B.; MAQBOOL, Z. (2013), **Energy-Efficient Hierarchical Cluster Based Routing Algorithm In Wsn: A Survey.** In: ESRSA Publications, 5 ago. 2013.
- BIPANDEEP SINGH et al Int. **Journal of Engineering Research and Applications** ISSN : 2248-9622, Vol. 4, Issue 3(Version 1), March 2014, pp.470-474
- BRONZATTI, L. F. C. **Análise sobre a tecnologia de rede sem fio Zigbee / IEEE 802.15.4.** 2013. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- COAN, W. S. **Roteamento em Redes de Sensores Sem Baseado no Caminho Mais Forte em Energia.** 2012. 89 f. Dissertação (Ciências da Computação) - Universidade Católica do Paraná, Curitiba.
- CORREIA, L. et al. (2005), **Uma taxonomia para protocolos de controle de acesso ao meio em redes de sensores sem fio.** *Annales des Telecommunications.* (Paris: 2005).

CHEN, Y.; YANG, Y.; YI, W. (2010), **A cooperative routing algorithm for lifetime maximization in wireless sensor networks**. In: IET. *Wireless Sensor Network, 2010. IET-WSN. IET International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 167–172.

CHITNIS, L.; DOBRA, A.; RANKA, S. (2009), **Fault tolerant aggregation in heterogeneous sensor networks**. *J. Parallel Distrib. Comput.* 2009, 69, 210–219.

DAN SIMON, MEHMET ERGEZER, AND DAWEI DU, (2009), **Population Distributions in Biogeography- Based Optimization Algorithms with Elitism**, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 991 – 996, October 2009.

ENGINEER LIVE (2013), **Low-power Zigbee module has 4km range**. *Engineer Live*, 21 o fevereiro, Disponível em: <<http://www.engineerlive.com/content/19359>>. Acesso em: 20 novembro. 2015.

E. SHI, A. PERRIG, **“Designing Secure Sensor Networks,”** *IEEE Wireless Commun.*, 2004, Vol. 11, Issue 6, pp. 38-43.

FRERIS, N.M.; KOWSHIK, H.; KUMAR, P.R.(2010), **Fundamentals of large sensor networks: Connectivity, capacity, clocks, and computation**. *Proc. IEEE* 2010, 98, 1828–1846

H. ZHOU, D. LUO, Y. GAO, D. ZUO, **“Modeling of Node Energy Consumption for Wireless Sensor Networks,”** *Wireless Sensor Network*, 2011, Vol. 3, Issue 1, pp. 18-23.

HEINZELMAN, W.; KULIK, J.; BALAKRISHNAN, H. (1999), **Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks**. In: *ACM. Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 1999. p. 174–185.

HEINZELMAN, W.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. (2000), **Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks**. In: *IEEE. System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on*. [S.l.], 2000. p.10–pp.

HEINZELMAN, W. B.; CHANDRAKASAN, A. P.; BALAKRISHNAN, H. (2002), **An applicationspecific protocol architecture for wireless microsensor networks**. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 660–670

HEINZELMAN, W. (2000), **EnergyEfficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks** in: *Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii, 2000*. Disponível em: <http://pdos.csail.mit.edu/decouto/papers/heinzelman00.pdf>

HUALIANG CHEN, YUEMING CAI, WEIWEI YANG, DONGMEI ZHANG, YINGBO HU, **Throughput and energy efficiency of a novel cooperative ARQ strategy for wireless sensor networks**, *Computer Communications*, Volume 35, Issue 9, 15 May 2012, Pages 1064-1073, ISSN 0140-3664.

IEEE Standard for Information Technology - **Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 15.4 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for**. [S.l.]: [s.n.], 2003.

IEEE: 802 LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE. **IEEE: 802 LAN/MAN Standards Committee**. Disponível em: <<http://www.ieee802.org>>. Acesso em: 2 abr. 2015.

INTANAGONWIWAT, C. et al. (2003), **Directed diffusion for wireless sensor networking**. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 2–16, 2003.

ISHMANOV, F.; MALIK, A. S.; KIM, S. W. (2011), **Energy consumption balancing (ECB) issues and mechanisms in wireless sensor networks (WSNs): a comprehensive overview**. *European Transactions on Telecommunications*, 151–167.

J. PAEK, K. CHINTALAPUDI, R. GOVINDAN, J. CAFFREY, S. MASRI, “**A Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring: Performance and Experience**,” In Proc. 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors EmNetS-II, Sydney Australia, 2005, pp. 1-10.

LEE, S.H.; LEE, S.; SONG, H.; LEE, H.S. (2011), **Gradual Cluster Head Election for High Network Connectivity in Large-Scale Sensor Networks**. In Proceedings of 13th International Conference on Advanced Communication Technology, Phoenix Park, Korea, 13–16 February 2011; pp. 168–172.

LI, C.; ZHANG, H.X.; HAO, B.B.; LI, J.D. (2011), **A survey on routing protocols for largescale wireless sensor networks**. *Sensors* 2011, 11, 3498–3526.

LI, J.; MOHAPATRA, P. **Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks**. *Pervasive Mobile Comput.* 2007, 3, 233-254.

LINDSEY, S.; RAGHAVENDRA, C. (2002), **Pegasis: Power-efficient gathering in sensor information systems**. In: IEEE. *Aerospace conference proceedings, 2002. IEEE*. [S.l.], 2002. v. 3, p. 3–1125

LIMA, H. F. D. S. **Abordagem Comparativa do Desempenho dos Protocolos de Roteamento Utilizados no Padrão IEEE 802.15.4 para a Indústria de Petróleo e Gás Natural**. 2013. 95 f. Monografia (Bacharelado em Ciências da Computação) – Universidade do Estadual do Rio Grande do Norte, Natal.

LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M. S.; RUIZ, L. B.; MINI, R. A. F. de.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. **Redes de Sensores Sem Fio**. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES, 2003, Natal.

MOREIRA, A. I. B. **Análise de QOS do protocolo Zigbee no monitoramento remoto de unidade de produção de biodiesel da refinaria potiguar Clara Camarão**. 2014. 65 f. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Natal.

MOREIRA, I. A. T. **Uma abordagem experimental do protocolo ZigBee em um ambiente simulado de Comunicação Intraveicular**. 2012. 76 f. Monografia (Bacharelado em Ciências da Computação) - Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Natal.

MURUGUNATHAN, D., et al. (2005), **A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks**. *IEEE Radio Communications*. March 2005 pp. S8-S13.

NIKOLAOS A. PANTAZIS, DIMITRIOS D. VERGADOS, “**A Survey on Power Control Issues in Wireless Sensor Networks,**” IEEE Communications Surveys, 2007, Vol. 9, Issue 4, pp. 86-107.

OLIVEIRA, F. D. M. **FTE-LEACH: um protocolo energeticamente eficiente e tolerante a falhas aplicado às redes industriais de sensores sem fio.** Natal, 2015. 144f. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

OLIVEIRA, F. D. M. **Desenvolvimento de um Software de Comunicação sem Fio Aplicado à Instrumentação de Unidade de Elevação de Petróleo Tipo Plunger Lift.** 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

OLIVEIRA, F. D. M. **Um Novo Protocolo Tolerante a Falhas Aplicado às Redes de Sensores sem Fio.** 2012. 131 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

OZDEMIR, S.; XIAO, Y. (2009) **Secure data aggregation in wireless sensor networks: A comprehensive overview.** Comput. Netw. 2009, 53, 2022–2037.

PAL V, SINGH G, YADAV R P. (2012), **Energy Efficient Cluster Head Selection Scheme: A Change in Node Death Scenario of LEACH for Surveillance Wireless Sensor Networks[C].** Proceedings of 2012 2nd IEEE International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing, Washington, DC, USA. 2012: 865 - 869.

PAZZI, R. W. N.; ARAUJO, R. B. de; BOUKERCHE, A. **Um algoritmo tolerante a falhas e de baixa latência para redes de sensores sem fio.** *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBT*, 2004.

POTTIE, G.J.; KAISER, W.J. **Wireless integrated network sensors.** Communications of the ACM 43 (5) (2000) 551 –558.

RAJAGOPALAN, R.; VARSHNEY, P.K. **Data-aggregation techniques in sensor networks: A survey.** IEEE Commun. Surv. Tutor, 2006, 8, 48–63.

RENUGADEVI, G.; SUMITHRA, M. G. (2013), **Hierarchical Routing Protocols for Wireless Sensor Network-A Survey.** *TechRepublic.*

S. DENGLER, A. AWAD, F. DRESSLER, “**Sensor/Actuator Networks in Smart Homes for Supporting Elderly and handicapped People,**” In Proc. 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, Niagara Falls, 2007, Vol. 2, pp. 863-868.

S. LI, (2006), “**Wireless Sensor Actuator Network for Light Monitoring and Control Application,**” In Proc. IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas, 2006, Vol. 2, pp. 974-978.

SEAH, W., TAN, Y. Eds. (2010), **Sustainable Wireless Sensor Networks.** InTech Open Access Publisher: Rijeka, Croatia, 2010.

SILVA, I. M. D. **Redes de Sensores sem Fio aplicadas em Ambientes Industriais de Petróleo e Gás.** 2006. 92 f. Monografia (Engenharia de Computação) – Universidade do Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SHAFIULLAH, G.M.; AZAD, S.A.; Ali, A.B.M.S., "**Energy-Efficient Wireless MAC Protocols for Railway Monitoring Applications**," *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol.14, no.2, pp.649,659, June 2013 doi: 10.1109/TITS.2012.2227315.

TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N. B.; HEINZELMAN, W. (2002), **A taxonomy of wireless micro-sensor network models**. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, ACM, 81 New York, NY, USA, v. 6, n. 2, p. 28–36, abr. 2002. ISSN 1559-1662. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/565702.565708>>.

YOUNIS, O.; FAHMY, S. (2004), **HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks**. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 366–379.

YUE, J.; ZHANG, W.; XIAO, W.; TANG, D.; TANGG, J. (2009), **Energy efficient and balanced cluster-based data aggregation algorithm for wireless sensor networks**. *Procedia Eng.* 2012, 19, 2009–2015.

ZHENSHAN, BAO; BO XUE; WENBO ZHANG. **HT-LEACH: An Improved Energy Efficient Algorithm Based on LEACH** in International Conference on Mechatronic, Electric Engineering and Computer (MEC), 2013.

ZOU, C.; LU, Y. (2012), **A time synchronization method for wireless sensor networks**. In: *Information Computing and Applications*. [S.l.]: Springer, 2012. p. 221–228.