

# **Análise e Utilização de Protocolos de Redes de Sensores Sem Fios**

**André Manuel Rodrigues Teixeira**

Dissertação apresentada à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de  
**Mestre em Sistemas de Informação**

Orientado por  
**Rui Pedro Sanches de Castro Lopes**

**Bragança**  
**Outubro de 2016**



# **Análise e Utilização de Protocolos de Redes de Sensores Sem Fios**

**André Manuel Rodrigues Teixeira**

Dissertação apresentada à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de  
**Mestre em Sistemas de Informação**

Orientado por  
**Rui Pedro Sanches de Castro Lopes**

**Bragança**  
**Outubro de 2016**



# Dedicatória

Dedico este trabalho a todas as pessoas que acreditaram em mim, que me apoiaram e que de várias formas ajudaram-me a chegar ao fim desta etapa. Especialmente, aos meus pais e amigos.



# Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Rui Pedro Lopes, pela sua ajuda, disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos de forma simples e eficaz.

Um especial agradecimento a todos os docentes que estão ligados ao curso de Sistemas de Informação, pela sua simpatia, humor, disponibilidade e profissionalismo. Todos contribuíram para que este caminho fosse possível e concretizado com a aquisição de experiências e conhecimentos sólidos. Todos contribuíram para desenvolver um melhor aluno, profissional e ser humano.

Tenho também todo o prazer em agradecer aos meus colegas e amigos que estiveram sempre disponíveis para ajudar, trocar impressões e passar bons bocados de tempo na sua companhia.





# Resumo

Uma Rede de Sensores sem Fio (RSSF) é constituída por um conjunto de dispositivos sem fios distribuídos numa determinada área, com o objetivo de monitorizar variáveis como a temperatura, humidade, pressão e outras, em locais que a sua implementação seja preferível ou benéfica em relação às típicas redes cabladas.

Para estas RSSF poderem satisfazer as diferentes necessidades de implementação têm de possuir determinados requisitos como o baixo custo, baixa latência e baixo consumo energético. Os protocolos de encaminhamento têm um papel fundamental para a sintonia entre os principais requisitos das RSSF, pelo que foram desenvolvidos protocolos para determinadas necessidades e, em alguns casos, posteriormente alterados para oferecer melhor adaptação a diferentes ambientes.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise sobre os protocolos de encaminhamento usados nas RSSF, as suas características e funcionamento, com a intenção de criar um documento que reúna a informação mais importante e, de uma forma simples, para orientar futuras decisões para o desenvolvimento de futuros projetos nesta área.

**Palavras-chave:** Redes de Sensores Sem Fios; Sensores; Protocolos; ZigBee



# Abstract

A Wireless Sensor Network (WSN) is constituted by a set of wireless devices distributed over a certain area, for the purpose of monitoring variables such as temperature, humidity, pressure and others, in places that its implementation is preferred or beneficial compared to typical wired networks.

For these WSN can meet the different deployment needs must have certain requirements such as low cost, low latency and low power consumption. routing protocols have a key role in the harmony between the main requirements of WSN, so protocols have been developed for specific needs and, in some cases, subsequently amended to provide better adaptation to different environments.

This paper aims to present an analysis of the routing protocols used in WSN, its features and operation, with the intention of creating a document containing the most important information and, in a simple way, to guide future decisions for development future projects in this area.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks; Sensors; Protocols; ZigBee



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS .....	1
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	2
<b>2</b>	<b>REDES DE SENSORES SEM FIOS .....</b>	<b>3</b>
2.1	SENSORES .....	5
2.2	APLICAÇÃO DAS REDES DE SENSORES .....	6
2.3	DESAFIOS E PROBLEMAS .....	7
2.4	COMUNICAÇÃO EM RSSF .....	8
2.5	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO .....	10
2.5.1	Protocolos MAC .....	10
2.5.2	Protocolos de Encaminhamento .....	11
2.5.3	Métodos de Comunicação .....	12
2.6	ARQUITETURA DE UMA RSSF .....	13
2.7	PLATAFORMAS DE DESENVOLVIMENTO .....	14
2.7.1	Sistemas Operativos .....	16
2.7.2	Middleware .....	17
2.8	PADRÕES DE COMUNICAÇÃO .....	17
2.9	OTIMIZAÇÃO .....	19
2.10	SEGURANÇA .....	19
<b>3</b>	<b>PROTOCOLOS DE RSSF .....</b>	<b>21</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DOS PROTOCOLOS .....	22
3.1.1	ZigBee .....	23
3.1.2	ANT .....	25
3.1.3	SPIN .....	26
3.1.4	LEACH .....	27
3.1.5	Outros Protocolos .....	27
3.2	CLASSIFICAÇÃO DE PROTOCOLOS .....	30
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO E CASOS DE ESTUDO .....</b>	<b>32</b>
4.1	SIMULADORES E EMULADORES .....	32
4.2	ESCOLHA DO SIMULADOR .....	34

4.3	METODOLOGIA .....	36
4.4	CENÁRIOS .....	37
4.5	TESTES.....	40
4.5.1	Latência fim-a-fim.....	40
4.5.2	Dados ignorados.....	42
4.5.3	Carga.....	44
4.5.4	Taxa de Transferência .....	45
4.5.5	Total de tráfego enviado e recebido.....	47
4.6	RESULTADOS GLOBAIS .....	49
<b>CONCLUSÃO .....</b>		<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>55</b>

# Índice de figuras

Figura 1 - Rede de Sensores Sem Fios.....	4
Figura 2 - Nós numa Rede de Sensores Sem Fios .....	5
Figura 3 - Exemplo de Topologias.....	10
Figura 4 - Comparação das pilhas de protocolos.....	13
Figura 5 - Cenário da topologia em malha .....	39
Figura 6 - Cenário da topologia em árvore .....	39
Figura 7 - Cenário da topologia em estrela.....	39
Figura 8 - Latência fim-a-fim, transferência de fotografias a cores .....	40
Figura 9 - Latência fim-a-fim, transferência de fotografias cinza .....	40
Figura 10 - Latência fim-a-fim, transferência de medições de vento .....	41
Figura 11 - Latência fim-a-fim, transferência de medições de temperatura .....	41
Figura 12 - Dados ignorados, transferência de fotografias a cores.....	42
Figura 13 - Dados ignorados, transferência de fotografias cinza .....	42
Figura 14 - Dados ignorados, transferência de medições de vento.....	43
Figura 15 - Dados ignorados, transferência de medições de temperatura.....	43
Figura 16 - Carga para transferência de fotografias a cores .....	44
Figura 17 - Carga para transferência de fotografias cinza .....	44
Figura 18 - Carga para medições de vento.....	44
Figura 19 - Carga para medições de temperatura.....	45
Figura 20 - Taxa de transferência para fotografias a cores .....	45
Figura 21 - Taxa de transferência para fotografias cinza .....	46
Figura 22 - Taxa de transferência para medições de vento .....	46
Figura 23 - Taxa de transferência para medições de temperatura .....	46
Figura 24 - Tráfego enviado e recebida com transmissão de fotografias a cores	47
Figura 25 - Tráfego enviado e recebida com transmissão de fotografias cinza ..	47
Figura 26 - Tráfego enviado e recebida com transmissão de medições de vento .....	48
Figura 27 - Tráfego enviado e recebida com transmissão de medições de temperatura .....	48
Figura 28 - Tráfego enviado e recebida com transmissão de medições de vento (ACK ativo).....	51





# Índice de tabelas

Tabela 1 - Tabela comparativa de padrões de comunicação .....	18
Tabela 2 - Categorização de Protocolos .....	22
Tabela 3 - Comparação de Protocolos [48] .....	31
Tabela 4 - Cenários de simulação .....	37
Tabela 5 - Parâmetros de configuração dos cenários .....	38
Tabela 6 - Valores comparativos de simulações e topologias .....	49

# Lista de abreviaturas

<b>RSSF</b>	Redes de Sensores Sem Fios
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection
<b>ISO</b>	International Organisation for Standardisation
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>BLE</b>	Bluetooth Low Energy
<b>TDMA</b>	Time division multiple access
<b>CDMA</b>	Code division multiple access
<b>FDMA</b>	Frequency division multiple access
<b>SDMA</b>	Space division multiple access
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity
<b>CSMA/CA</b>	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
<b>PAN</b>	Personal Area Network
<b>ACK</b>	Acknowledgement
<b>PHY</b>	Physical Layer
<b>NWK</b>	Network Layer

# 1 Introdução

A área das Redes de Sensores sem Fios (RSSF) tem, atualmente, grande importância devido ao fato da intensidade com que estão a ser utilizadas e as suas imensas áreas de aplicação possíveis. No âmbito da dissertação, é feito um estudo sobre as características e funcionamento das RSSF. Sendo uma área de estudo abrangente, atual e com bastante utilidade em diversos setores, este estudo revela-se útil para o conhecimento e divulgação desta tecnologia de forma a poder ser compreendida e utilizada em diversas situações.

## 1.1 Motivação e Objetivos

As redes de sensores têm vindo a ser utilizadas em diversas áreas e com diferentes objetivos. Desde a área da saúde, onde monitorizam parâmetros vitais, à construção civil, realizando medições do esforço de estruturas, os dados obtidos permitem otimizar ou analisar o comportamento de diversos parâmetros para aumentar a segurança, prevenir situações de risco ou outras.

Devido à importância que estas redes estão a ter a cada dia que passa, há uma maior necessidade de concentrar o máximo de informação, de forma a facilitar futuras implementações e estudos destas redes.

Assim, pretende-se com este trabalho, estudar e analisar características e funcionamentos das redes de sensores sem fios e dos seus protocolos, por forma a avaliar e comparar consumos energéticos, latência e capacidade de transmissão através de simulações.

Os resultados deste trabalho poderão ser posteriormente utilizados, como base de opção em situações de desenvolvimento de redes de sensores para diversas aplicações.

## **1.2 Estrutura do Documento**

Este documento está dividido em cinco capítulos.

No Capítulo 2 é feita uma abordagem geral sobre as RSSF, as suas principais características, estrutura e funcionalidades.

No Capítulo 3 é feito um estudo dos protocolos mais populares utilizados nas RSSF, com a finalidade de comparar os protocolos por forma a distingui-los em função das suas características.

No Capítulo 4 são apresentadas as simulações e respetivos resultados.

O documento termina no Capítulo 5 com algumas conclusões.

## 2 Redes de Sensores Sem Fios

Nas últimas décadas, o número de equipamentos capazes de comunicarem entre si e os próprios métodos de comunicação têm vindo a aumentar, principalmente devido ao desenvolvimento de novas tecnologias. Este aumento reflete-se em novos serviços e processos que vêm facilitar, melhorar e criar novas tarefas, que até então, eram realizadas de forma menos eficiente, mais dispendiosa, ou mesmo impossíveis de realizar.

Para a transferência de dados entre equipamentos, estes têm, normalmente de respeitar vários *standards* de comunicação, por forma a promover a interoperabilidade entre eles. As comunicações sem fios são suportadas por diferentes tecnologias e, conseqüentemente, por vários *standards* de comunicação. Os exemplos de tecnologias e *standards* mais conhecidos são *Bluetooth* e os *standards* 802.11 do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE).

O desenvolvimento das várias tecnologias de transmissão de dados por radiofrequência veio permitir o desenvolvimento de equipamentos e serviços numa área relativamente recente, conhecida como Redes de Sensores sem Fios.

As RSSF são constituídas geralmente por vários sensores (nós), distribuídos geograficamente, para monitorizar uma condição física ou ambiental. Os sensores tanto podem ser micro equipamentos, de reduzidas dimensões, baixo peso e baixo consumo energético, como equipamentos do tamanho de computadores de secretária. As RSSF são usadas em diversas áreas e com diversas aplicações, tais como a agricultura, saúde, transportes, ambiente, construção e outras. Os sensores que constituem as RSSF são resultado da evolução das tecnologias de comunicação e computação juntamente com os avanços tecnológicos nos dispositivos de baixa potência e consumo energético.

Deste modo surgem cada vez mais objetos e ambientes que podem beneficiar a vários níveis com a implementação de RSSF [1][2].

Uma RSSF pode ser constituída por um reduzido número de sensores que podem comunicar diretamente com a estação base ou por milhares de sensores que podem comunicar entre si e com a estação base, o número de sensores e como comunicam varia com o tipo de aplicação que estes vão ter (Figura 1).

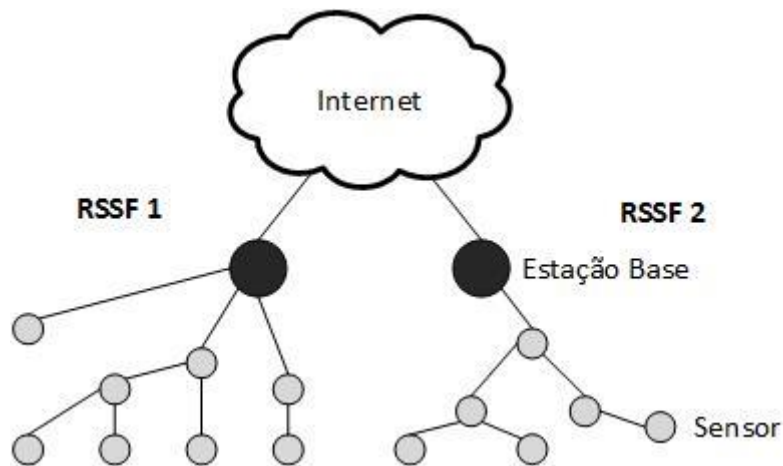


Figura 1 - Rede de Sensores Sem Fios

## 2.1 Sensores

O objetivo dos sensores é obter informação sobre um determinado evento ou estado de algo, como por exemplo, fazer a leitura de temperaturas e pressões. Após obter a informação que se pretende, o sensor faz uso do *analog-to-digital converter* (ADC) para fazer a tradução de sinais analógicos para digital que são recebidos por controladores ou sistemas computacionais, para processamento, visualização ou armazenamento. Há sensores que têm atuadores que podem interagir diretamente com diversos equipamentos, por forma a alterar o seu estado ou funcionamento [3].

A complexidade dos sensores pode variar entre uma simples função de monitorizar temperaturas com um termístor e comunicar apenas por rádio frequência, ou ser mais complexo e fazer uso de vários tipos de medidores, com comunicação por rádio frequência, infravermelhos ou ultrassons. Os sensores mais complexos podem também ter um maior poder de processamento e armazenamento.

Há diferentes tipos de nó com diferentes funções (Figura 2).

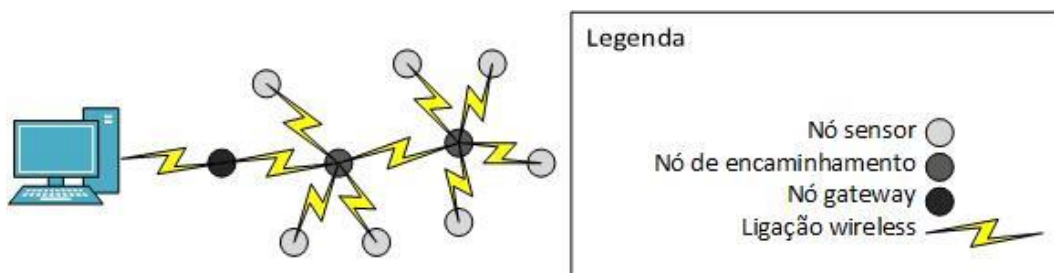


Figura 2 - Nós numa Rede de Sensores Sem Fios

Os mais comuns numa RSSF são:

**Sensor** (sensor medidor): só pode ter a função de monitorização de uma condição física ou ambiental e enviar os dados para outros nós.

**Encaminhador** (*router*): responsável por receber dados de outro nó e encaminhá-los para o *sink-node*. Este nó pode também ter a função de sensor, monitorizando o valor em causa e enviar dados.

**Sink-node** (*gateway*): nó responsável por recolher ou pedir dados aos outros nós e enviar os dados para outra rede ou para a estação base.

**Controller** (coordenador): quando há necessidade de usar um nó deste tipo é normalmente para coordenar os restantes nós, coordenar rotas, agendar transmissões, fazer a sincronização entre nós, etc.

## 2.2 Aplicação das Redes de Sensores

As RSSF são atualmente aplicadas em diversas áreas passíveis de algumas formas de medição, ou seja, em áreas em que seja possível obter mais conhecimento/informação, melhorar ou gerir algo automaticamente. São apresentados de seguida alguns casos específicos em diversas áreas onde são usadas RSSF:

- **Monitorização Ambiental:** na floresta da Costa Rica na América Central, um grupo de investigadores está a usar RSSF para recolher dados sobre a troca de CO<sub>2</sub> entre a floresta e a atmosfera (fluxo de carbono) [4].
- **Agricultura e Produção Alimentar:** nesta área estão a ser usadas RSSF para medir temperatura, humidade e luz e mediante os resultados reprogramar o sistema de rega por forma a garantir que as plantações crescem nas melhores condições possíveis [5].
- **Transportes:** monitorizar a ocupação de parques de estacionamento, com objetivo recolher e posteriormente estudar a informação para identificar diversos padrões no comportamento dos condutores nestes ambientes [6].



- **Segurança Militar:** a VigilNet é um projeto para missões de vigilância que tem como objetivo identificar e comunicar movimentações de qualquer veículo das forças inimigas em regiões hostis [7].

## 2.3 Desafios e Problemas

O desenho e a comunicação de RSSF está condicionada por vários fatores, entre os quais, o objetivo da rede, dimensões da rede, o meio ambiente onde a rede vai ser inserida, condições atmosféricas. Adicionalmente, há um conjunto de opções que têm de ser tomadas, de forma a operacionalizar uma rede deste tipo. O posicionamento de cada sensor é um trabalho que tem de ser calculado com precisão. Várias funções dos sensores dependem do seu correto funcionamento. Além de terem de estar no local correto para a recolha da informação pretendida, estes têm de estar a uma correta distância da estação base ou de outros sensores, por forma a evitar problemas de comunicação, localização dos sensores ou cobertura geográfica [8][9][10][11].

A eficiência energética é um dos problemas mais comuns, que varia com o objetivo, dimensões e funções dos sensores, taxa de envio de dados, condições geográficas e orçamento da rede. Daí a escolha do tipo de bateria que o sensor vai usar ser tão importante. Se o objetivo da RSSF for a monitorização das condições atmosféricas durante um longo prazo num local de difícil acesso têm de ser consideradas baterias de longa duração, por forma a reduzir ao máximo o número de deslocações para a sua substituição [3][9][12][13].

Em locais de remoto acesso, os sensores têm de ter a capacidade de se auto configurarem e de adaptarem a falhas sem a intervenção humana para a sua manutenção ou reparação [3][9]. A gestão da rede e do encaminhamento por parte da estação base (centralizada) ou por parte de cada nó (descentralizada) tem diferentes resultados e impactos em toda a rede. Numa gestão centralizada há uma melhor eficiência energética e melhor escolha de rotas mas pode

sobrecarregar os nós em caso de topologias que se alteram com frequência. No caso da gestão descentralizada, os nós assumem a capacidade de tomar decisões que levam a um maior consumo de energia, escolha de rotas menos eficaz mas leva a uma poupança nas despesas gerais de gestão [3][9][12].

Quer a informação transmitida entre nós, quer os próprio nós, estão expostos e vulneráveis a vários tipos de ataques. Ataques como intrusão maliciosa para recolha de informação, *denial-of-service* e *jamming*, são alguns dos problemas de segurança que afetam as RSSF. A solução passa por utilizar métodos de autenticação entre nós e encriptação dos dados transferidos entre si [3][12][14].

A comunicação, geralmente do tipo *Multi-Hop*, requer a tarefa de encontrar o melhor caminho de entre os nós até à estação base. Quando um nó agrega e processa dados transmitidos por outros nós, pode levar à eliminação de informação redundante ou a agregação dos dados pode resultar em menos informação que a original [3].

Todas estas características são reconhecidas pela comunidade de investigadores que estão a trabalhar no sentido de diminuir os fatores condicionantes e aumentar a potencialidade das RSSF.

## 2.4 Comunicação em RSSF

O tipo de comunicação nas RSSF depende do tamanho da área geográfica que abrangem e dos objetivos da rede. A comunicação nas RSSF pode ser classificada quanto à Disseminação, Tipo de Conexão, Transmissão, Alocação de Canal, Fluxo de Informação e Cooperação [15]:

- **Disseminação:** programada, os nós enviam os dados em intervalos de tempo previamente configurados; contínua, os nós enviam os dados continuamente; sob-pedido, os nós enviam os dados apenas quando recebem um pedido de dados.

- **Tipo de Conexão:** simétrica, as conexões entre nós têm o mesmo alcance; assimétrica, as conexões entre nós têm diferente alcance.
- **Transmissão:** simplex, os nós apenas transmitem informação; half-duplex, os nós podem transmitir ou receber informação; full-duplex, os nós podem transmitir e receber informação em simultâneo.
- **Alocação de Canal:** estática, a largura de banda é dividida de igual forma pelos nós quer em TDMA, CDMA, FDMA, SDMA ou OFDM; dinâmica, não existe atribuição fixa de largura de banda.
- **Fluxo de Informação:** flooding, os nós fazem broadcast dos dados para os seus nós vizinhos e estes fazem broadcast para os seus vizinhos e assim sucessivamente até os dados chegarem ao seu destino; multicast, os nós formam grupos e usam o *multicast* para a comunicação dentro do grupo; unicast, os nós comunicam diretamente com o ponto de acesso, usando protocolos de encaminhamento *multi-hop*; gossiping, os nós selecionam os nós que vão receber os seus dados; bargaining, os nós só enviam os dados se houver interesse por parte de algum nó.
- **Cooperação:** infraestrutura, os nós sensores têm as funções de descoberta de localização, uso de algoritmos para controlo de acesso ao meio, eleição de líderes, encaminhamento e criptografia; localizada, além das funções no modo de Infraestrutura, os nós ainda podem ter funções básicas de processamento de dados; correlação, além das funções no modo de infraestrutura, os nós ainda podem ter funções avançadas de processamento de dados.

Tipologia e tipo de comunicação, em RSSF de pequenas dimensões os sensores podem comunicar diretamente com a estação base numa topologia em estrela com comunicação tipo *Single-Hop* (Figura3). Nos casos em que os sensores são dispersos em grandes áreas geográficas pode ser usada uma topologia em malha com comunicação *Multi-Hop*, em que os sensores além de

terem de recolher e transmitir os seus dados têm também de agregar e transmitir os dados de outros sensores por forma a propagar os dados até à estação base.

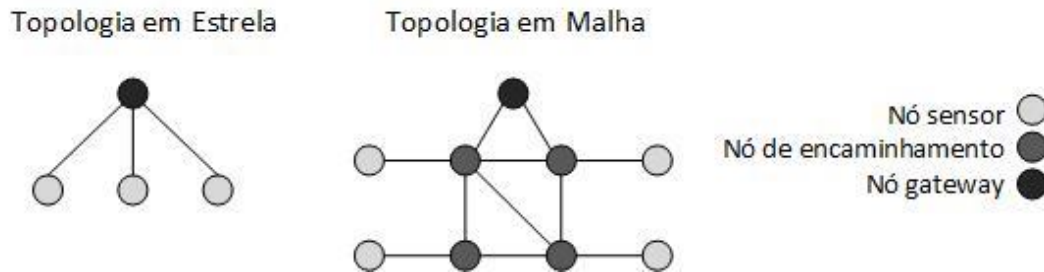


Figura 3 - Exemplo de Topologias

## 2.5 Protocolos de Comunicação

Existe, atualmente, um grande número de protocolos de comunicação para as RSSF que atuam em diferentes camadas, independentemente das suas características, nível de atuação e finalidade. Uns têm marcado o mundo das RSSF graças as suas amplas capacidades, outros, devido á sua especificidade e potencial, o que os torna mais adequados a determinadas situações. São apresentadas de seguida as características dos protocolos MAC da camada de enlace de dados e os protocolos da camada de rede.

### 2.5.1 Protocolos MAC

Os protocolos da camada 2 do modelo de referência também conhecido como MAC (*Medium Access Control*) foram desenvolvidos para redes *ad hoc*, otimizados mais para a eficiência de transmissão que a eficiência energética. Como a eficiência energética revelou-se um dos fatores mais importantes nas RSSF, foram criados novos protocolos MAC por forma a se adaptarem às necessidades das RSSF e assim passaram a focar-se tanto na eficiência de transmissão como na eficiência energética.

Os protocolos MAC podem ser divididos em duas categorias: escala (reserva de recursos) e contenção. Os protocolos MAC baseados em escala têm como objetivo reservar e agendar as transmissões, do tipo *Time Division Multiple Access* (TDMA), em que há um nó responsável por distribuir a escala de transmissão entre os restantes nós da rede. Os protocolos MAC baseados em contenção têm como objetivo verificar se há alguma comunicação em transmissão e, se for o caso, os sensores nó têm de aguardar e adiar a sua comunicação. Estes protocolos são do tipo *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) [16][17][18].

## 2.5.2 Protocolos de Encaminhamento

A recolha de dados e o encaminhamento destes é despoletado por consultas feitas por aplicações ou por eventos específicos programados. Em muitos casos é necessário agregar os dados obtidos pelos vários sensores antes de os enviar para a estação base por forma a reduzir o consumo energético e o número de mensagens transmitidas.

De forma geral os protocolos da camada 3 do modelo de referência podem ser classificados ou categorizados de várias formas, aqui destacam-se as duas formas mais comuns de classificação, quanto à sua estrutura ou forma de organização da rede e quanto aos seus métodos de operação.

Quanto à estrutura de rede, os protocolos podem ser *data-centric*, hierárquicos e baseados na localização. Nos primeiros, os sensores *sink* fazem *broadcast* de um pedido numa determinada região, para saber se há dados para estes receberem ou para retransmitirem [16][19]. Os protocolos Hierárquicos, baseiam-se na formação de *clusters*, onde os sensores nó comunicam apenas com os vizinhos mais próximos, que agregam a informação por forma a enviar apenas a informação necessária para o nó *sink* [16][19]. Os protocolos Baseados na Localização, fazem uso da informação sobre a sua posição para transmitir os

dados para os destinos desejados, primeiro localizando o destino e só depois transmitindo os dados. A localização do destino da transmissão pode ser determinada pelo próprio sensor nó ou por informação no cabeçalho dos pacotes [16][19].

Quanto aos métodos de operação, estes podem classificar como *multipath-based routing*, *query-based routing*, *negotiation-based routing*, *QoS-based routing* e *noncoherent & coherent data-processing-based routing*. Relativamente ao primeiro, em vez de apenas um caminho, estes protocolos usam vários caminhos para melhorar o desempenho da rede [20]. No *query-based routing*, os protocolos funcionam com base no pedidos de dados, ou seja, o nó *sink* faz *broadcast* de um pedido de dados e os sensores que têm os dados respondem para o nó que fez o pedido. Os protocolos *negotiation-based routing*, através da marcação dos pacotes de dados estes protocolos, são capazes de eliminar dados redundantes no processo de negociação das transmissões.

Os protocolos *QoS-based routing* fazem uso de algumas métricas de QoS, por forma a manter um bom consumo de energia e a qualidade dos dados transmitidos até à estação base. Por último, os protocolos *noncoherent & coherent data-processing-based routing*, no caso dos protocolos de não coerência de processamento de dados, uns nós são responsáveis por processar alguns dados e depois transmiti-los, outros são responsáveis por processar e agregar os dados, por forma a manter uma rede com o menor tráfego possível. No caso dos protocolos de coerência de processamento de dados, os nós que transmitem quase de imediato os dados que recolhem para os nós que vão agregar os dados, por forma a garantir uma maior eficiência energética.

### 2.5.3 Métodos de Comunicação

Os protocolos de encaminhamento *unicast* estão divididos em duas categorias: protocolos baseados em localização e protocolos baseados em

topologia. Os protocolos baseados em localização usam mais informação porque têm de ter serviços e servidores para determinar e registar a localização de cada nó por forma a escolher os melhores caminhos. Os protocolos baseados em topologia usam tabelas de encaminhamento e quando necessário podem usar mecanismos para descoberta de rotas [21].

Os protocolos de encaminhamento *multicast* estão divididos em três classes: *source-based*, *core-based* e *mesh-based*. Os protocolos *source-based* e *core-based* têm como objetivo otimizar os recursos da rede evitando sobrecargas de encaminhamento e armazenamento, usando uma topologia em árvore em que o nó base conhece o caminho para todos os destinos. Os protocolos *mesh-based* necessitam de estruturas de encaminhamento mais complicadas, visto que cada um dos nós tem a capacidade de ser tanto um nó base como um nó comum, dadas as suas capacidades estes protocolos revelam um suporte falhas incomparável com os das outras classes [9][12].

## 2.6 Arquitetura de uma RSSF

A pilha de protocolos para as RSSF foi proposta pela *International Organisation for Standardisation* (ISO), de forma a melhor contemplar as características destas redes, tendo sido criado um modelo com cinco camadas, menos duas que o modelo OSI. A pilha das RSSF ficou então dividida em camada física, enlace de dados, rede, transporte e aplicação (Figura 4) [17].

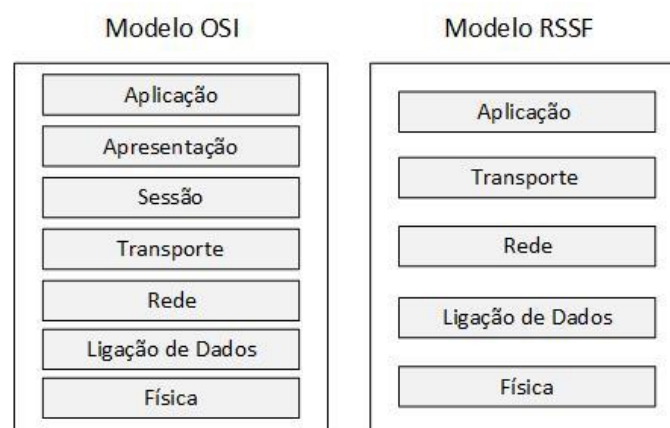


Figura 4 - Comparação das pilhas de protocolos

A camada física é responsável pela gestão das definições de comunicação, nomeadamente pela escolha das frequências do sinal, deteção de sinal, modulação e encriptação dos dados.

A camada de ligação de dados é responsável por garantir a comunicação entre os sensores, suportando os protocolos de *medium access control* (MAC), esta camada garante assim, a ligação entre sensores, controla o fluxo de dados, deteta e corrige erros.

A camada de rede é responsável por estabelecer caminhos de comunicação entre os sensores, suportando os protocolos de encaminhamento, esta camada garante assim, que os dados são transportados mediante os objetivos do protocolo escolhido.

A camada de transporte é responsável pela gestão do fluxo de dados. Como as RSSF não são baseadas em endereçamento global, este esquema entrega os pacotes com base nos atributos destes.

A camada de aplicação é responsável pela receção dos dados e entrega destes à aplicação que os recebe, ou seja, faz de interface entre o protocolo de comunicação e as aplicações.

## **2.7 Plataformas de Desenvolvimento**

Dependendo da dimensão e dos objetivos da rede pretendida, a tarefa de desenhar uma RSSF levanta algumas questões que têm de ser previamente analisadas e estudadas, por forma a garantir que esta vai de encontro aos objetivos pretendidos com o melhor desempenho e menor custo possível. O desenvolvimento de uma RSSF e respetivos componentes de raiz é uma tarefa que implica bastantes recursos.



Existem atualmente plataformas que disponibilizam grande parte ou todo o *hardware* e *software* necessário para a implementação e configuração de uma RSSF.

**TinyOS** é uma plataforma *open-source* desenvolvida para as RSSF desenhada especialmente para sensores de baixo consumo energético e reduzida largura de banda. Tem suporte para um grande número de microcontroladores e um protocolo que já se tornou um padrão. As principais características do TinyOS são, uma arquitetura baseada em componentes, um modelo de concorrência baseado em eventos e tarefas e operações divididas em fases [3][22]. Com uma arquitetura baseada em componentes, é possível selecionar apenas os componentes/serviços necessários e descartar os restantes. O sistema de controlo de tarefas baseia-se na criação de tarefas curtas e que são executadas na totalidade, faz uso da política *First In First Out* (FIFO). A divisão de operação em fases faz com que as operações de longa duração sejam divididas para que estas não ocupem os recursos em demasia, permitindo também o escalonamento de tarefas.

*“ZigBee is the only open, global wireless standard to provide the foundation for the Internet of Things”* [23]. Atualmente o ZigBee é um padrão de comunicação desenvolvido pela ZigBee Alliance, um grupo de empresas que trabalha em conjunto no desenvolvimento de produtos e soluções prontas para diferentes mercados e aplicações. O padrão ZigBee define as três últimas camadas do modelo de referência das RSSF, juntamente com o padrão IEEE 802.15.4 que define as duas primeiras camadas. O padrão ZigBee é constituído por quatro serviços base, encriptação, autenticação/associação, protocolos de encaminhamento e *clustering*. Uma rede ZigBee tem capacidade para adotar topologias em estrela, árvore, malha e *clusters* em árvore, com nós coordenadores, encaminhadores e sensores [24].

**ANT+** é uma tecnologia *wireless* dedicada às RSSF mais propriamente equipamentos dedicados à saúde, à casa e ao desporto. Este projeto promove a

interoperabilidade entre os seus dispositivos e uma melhor experiência de usabilidade. Esta tecnologia tem algumas semelhanças com a tecnologia *Bluetooth Low Energy* (BLE), mas difere-se num maior suporte para RSSF, com capacidade para suportar topologias mais complexas e com um nível de desempenho e consumo energético melhor que o BLE [25][26].

### 2.7.1 Sistemas Operativos

O sistema operativo (SO) de uma RSSF é o *software* que controla os recursos de hardware dos nós. É através do SO que os programadores podem desenvolver e alterar tarefas para obter o comportamento e desempenho que mais se adequa ao funcionamento desejado para a rede.

O SO disponibiliza diversas funções para gestão do *hardware*, tais como gestão da rede, memória, energia, e condicionam também os ambientes de desenvolvimento e ferramentas como linha de comando, compilador, depurador, entre outros.

Os SO para RSSF são classificados como *single-task/multitasking* e *single-user/multi-user*. A diferença entre *single-task* e *multitasking* está no número de tarefas que estes são capazes de realizar, uma tarefa para *single-task* e várias tarefas para o SO *multitasking*, embora este tenha um maior requisito de quantidade de memória, é capaz de oferecer um nível de desempenho mais satisfatório, pode realizar tarefas mais complexas e de maior duração, tem capacidade para interagir com o subsistema de comunicação e estar ao mesmo tempo a agregar dados provenientes dos sensores. A desvantagem do SO multitarefa é que vai aumentar o processamento e o consumo energético. A diferença entre SO *single-user/multi-user* está no número de utilizadores que podem aceder aos recursos em simultâneo, assim o *multi-user* permite a partilha de recursos entre vários utilizadores ao mesmo tempo [3].

Alguns exemplos de sistemas operativos para RSSF são, TinyOS, SOS, Contiki e LiteOS. Assim a escolha do SO mais adequado depende também da complexidade das funções que os nós vão desempenhar.

### 2.7.2 Middleware

Uma camada de middleware tem como função eliminar a complexidade de manipulação explícita dos protocolos e características da infraestrutura, dando aos utilizadores um alto nível de abstração para facilitar a configuração da rede e criar facilmente tarefas para melhorar o desempenho desta. A forma de implementar este sistema é com recurso a comunicação distribuída, facilitando a interação entre os componentes e as aplicações. Tal como um SO para RSSF, o middleware tem de ser tolerante a falhas, robusto, com reduzidas necessidades de processamento e armazenamento. Esta camada de middleware é inserida entre o sistema operativo e a aplicação distribuída [27][28][29]. Alguns exemplos de middleware são, Mate, Impala, SINA, TinyDB.

## 2.8 Padrões de Comunicação

A comunicação sem fios através do método de transmissão por frequência de rádio é o mais comum nas redes de computadores e talvez o único usado nas RSSF. Dentro do método de transmissão por frequência rádio existem dezenas de padrões de comunicação criados pelo IEEE, que definem as suas arquiteturas, características e especificações.

O IEEE 802.11 é o padrão mais usado para sistemas móveis e trabalha em diferentes bandas, 2.4 GHz ou 5 GHz, mais conhecido como *Wireless Fidelity* (Wi-Fi). Este *standard* é frequentemente usado em RSSF quando há necessidade de uma elevada largura de banda e o nível de consumo de energia é irrelevante. Usa a técnica *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), que consiste no teste do canal de transmissão para detetar transmissões a

decorrer, se houver, aguarda, se não, decide se transmite ou não, desta forma evita o máximo de colisões possível. No caso de RSSF com necessidades de largura de banda e de consumos energéticos reduzidos há outros padrões como o IEEE 802.15.4 que foi criado especificamente para sensores com “reduzidas necessidades” [3].

O IEEE 802.15.4 é um padrão semelhante ao IEEE 802.11 ao nível do funcionamento, trabalha na banda dos 2,4 GHz e faz também uso do método CSMA/CA. Mas as suas maiores diferenças para o IEEE 802.11 estão no reduzido consumo energético e reduzida largura de banda. Além disso este protocolo vem preparado para estar em modo de suspensão por longos períodos de tempo [17].

O 802.15.1 é o padrão utilizado pelo *Bluetooth*, trabalha na banda dos 2,4 GHz. É utilizado por equipamentos com necessidade de uma taxa de transmissão de dados entre os 0,5 Mbps e 1 Mbps, a curtas distâncias e utiliza a tecnologia CDMA. A partir da tecnologia *Bluetooth* padrão, foi criada a tecnologia BLE, também conhecida como *Bluetooth Smart*. É uma rede *wireless personal area network* (WPAN), com aplicações nas áreas da saúde, segurança, *fitness* e outras. Tem como principais características, o reduzido consumo energéticos e alta largura de banda disponível [30].

A tabela 1 apresenta alguns fatores de comparação entre os três padrões de comunicação com as respectivas taxas de desempenho dos equipamentos mais comuns.

	IEEE 802.11 b/g/n	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
Denominação comum	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Redes Alvo	WLAN	WPAN	RSSF
Largura de banda (Mbps)	11-54-600	0,7	0,020-0,25
Alcance de Transmissão (metros)	1-100	1-10	1-100
Objetivos	Servir o setor empresarial, escalabilidade, custos	Custos, facilidade de uso	Fiabilidade, custos, alcance

Tabela 1 - Tabela comparativa de padrões de comunicação

## 2.9 Otimização

Dependendo da finalidade da rede, a aplicação de QoS pode ter maior ou menor importância. Normalmente prevalece a eficiência energética, mas há casos em que é necessário notificar eventos críticos, pelo que a rede tem de ter o melhor desempenho possível. Quando o maior requisito é a eficiência energética, torna-se mais complicada a aplicação de QoS, visto ser uma característica que vai acrescentar à rede gastos energéticos e custos de processamento. No entanto, alguns protocolos já foram desenhados com base na eficiência energética e aplicação de QoS nos seus mecanismos de comunicação, tais como *Sequential Assignment Routing* (SAR) ou *Adaptive Forwarding Scheme* (AFS).

Existem várias formas de implementar QoS nas RSSF. Além das semelhantes às que são implementadas nas redes IP, como a classificação de pacotes, podem também ser obtidas otimizações na rede através da determinação de rotas e atribuição de diferentes níveis de permissões aos sensores nó ou pela atribuição de percentagem de cobertura de cada sensor nó.

## 2.10 Segurança

As RSSF são afetadas da mesma forma e por problemas de segurança semelhantes aos que afetam os restantes tipos de redes. O aumento da popularidade destas redes e o crescimento do número de implementações, são os fatores impulsionadores quer para o aumento de ataques quer para o desenvolvimento de melhores mecanismos de segurança.

Os ataques e vulnerabilidades mais comuns incluem os ataques físicos, dado que alguns sensores encontram-se em locais de fácil acesso, o que pode levar alguém a destruí-los ou tentar adquirir chaves criptográficas para poder comprometer a rede, ataques *Sybil*, em que um nó se pode fazer passar por outros sensores por forma a que seja selecionado para encaminhar os dados da

rede, ataque de *denial-of-service*, com o objetivo de fazer com que a rede ou os serviços deixem de funcionar ou funcionem com um desempenho muito inferior ao esperado [3][9][14].

Para (tentar) contrariar estas ameaças, os mecanismos de segurança incluem a o uso de criptografia (simétrica e assimétrica), em que são usadas chaves para cifrar e decifrar as mensagens, podendo garantir confidencialidade e autenticidade. Técnicas de controlo de acesso, para permitir que apenas as entidades autorizadas possam ter acesso à rede e aos equipamentos. Adicionalmente, há também a possibilidade de utilização de protocolos de segurança, que já implementam alguns mecanismos como por exemplo o *Secure Network Encryption Protocol* (SNEP) que fornece confidencialidade e autenticação e o *Timed, Efficient, Streaming, Loss-tolerant Authentication* (TESLA) fornece autenticação para o *broadcast* de dados [3][9].

## 3 Protocolos de RSSF

São os protocolos que controlam o funcionamento e as características das redes. No caso das RSSF, com características e necessidades muito particulares, a escolha dos protocolos é fundamental para que esta se mantenha o mais eficiente e confiável possível, durante o tempo previsto.

A variedade de protocolos existente é considerável, existindo já protocolos capazes de dar resposta à maioria das necessidades. Existem alguns protocolos que se têm destacado pelas suas características, o que leva a um crescimento de adeptos e por sua vez aparecem envolvidos em mais projetos para desenvolvimento de RSSF ou mesmo produtos completos, desde as especificações de comunicação nas diferentes camadas da arquitetura das RSSF aos equipamentos físicos. Além destes protocolos, existem outros também populares devido às suas características e modos de operação.

De entre várias formas de categorizar os protocolos das RSSF, o modo de operação destes é uma forma simples e ilustrativa de os distinguir e representar. A tabela 2 faz corresponder os protocolos ao seu método de operação.

Camada	Modo de Operação	Protocolos
Multicamada		<b>ZigBee, ANT</b>
Camada de Enlace de Dados		<b>S-MAC, T-MAC, B-MAC, ARC, DMAC, TRAMA, STEM, M-MPR</b>
Camada de Rede	Baseados em Atributos ou <i>Data-Centric</i>	<b>SPIN, Directed Diffusion (DD), Rumor, Cougar, Acquire, PEQ, EAD, SAR, SPEED</b>
	Hierárquicos	<b>LEACH, PEGASIS, ZigBee, HEED, HPEQ, TEEN, SPAN, DirQ, GAF, HEAP</b>
	Baseados em Localização	<b>SMECN, GEAR, GPSR, TBF, GAF, SPAN, TBF, SPEED</b>
Camada de Enlace de Dados ou Camada de Rede	Multi-path routing	<b>SAR, M-MPR, DD</b>
	Baseados em QoS	<b>PSFQ, ESRT, SAR, AFS, SPEED</b>

Tabela 2 - Categorização de Protocolos

### 3.1 Características e Funcionamento dos Protocolos

De entre diversos protocolos foram escolhidos alguns dos mais populares para efetuar uma descrição mais pormenorizada do seu funcionamento e características, para os restantes e representantes da categoria a que pertencem é feita uma descrição mais geral.



### 3.1.1 ZigBee

Uma rede ZigBee pode tomar diversas formas e características, tudo dependendo da necessidade que esta vai satisfazer. Uma rede ZigBee tanto pode ser distribuída como centralizada, económica ou eficiente, a nível de topologia pode ser representada em árvore, malha ou estrela. As taxas de transmissão definidas pelo padrão IEEE 802.15.4 são inferiores a 250Kbps, variando consoante a banda de frequências usada (2450Mhz, 915Mhz ou 868Mhz).

Uma rede ZigBee é composta por três tipos de nós: *coordinator*, *router* e *end device*. O nó coordenador é responsável por iniciar e gerir a rede, após iniciar a rede, o nó coordenador trabalha como *router*. Se a rede estiver a operar em modo *beacon-active*, o nó coordenador está constantemente a enviar *beacon frames* para sincronizar a rede. Se a rede estiver numa topologia em árvore, todos os nós *router* recebem *beacons* dos seus pais e geram *beacons* para enviar aos nós que pertencem ao seu *cluster*. O nó coordenador é o responsável por agregar a informação, existindo apenas um por rede, tipicamente o de maior poder computacional. O nó *router* é o responsável pelo encaminhamento dos pacotes entre os nós que não conseguem comunicar diretamente com o coordenador. O nó final é o responsável pela função de sensor ou atuador, apenas se podem comunicar com o nó *router* ou nó coordenador, este nó tem a capacidade de entrar em modo “*sleep*” por forma a reduzir o consumo de energia [24][31].

A tecnologia ZigBee pode ser implementada em qualquer uma das topologias de rede, árvore, malha ou estrela. Numa topologia em estrela a gestão e comunicação da rede é centralizada, os nós finais nunca comunicam entre si, toda a comunicação passa pelo nó central (nó coordenador) que, após inicializar a rede, passa a trabalhar como nó *router*, identificado com um PAN ID único. Os pontos desfavoráveis nas topologias em estrela são o consumo energético do nó central e a gestão de redes de grande escala. A topologia em

malha também trabalha de forma centralizada mas pode usar vários nós *router* centrais que comunicam entre si e disponibilizam múltiplas rotas entre os nós, dando à rede uma maior flexibilidade e melhor gestão de energia que a rede em estrela. A topologia em árvore é a que potencia um menor consumo de energia. Dispõem de processos de gestão de largura de banda e apenas permite rotas únicas entre o nó de origem e o nó de destino [32].

A arquitetura do protocolo ZigBee é dividida em quatro camadas, duas definidas pela *ZigBee Alliance* e 2 definidas pelo padrão IEEE 802.15.4. As camadas mais altas definidas pela *ZigBee Alliance* são a camada de rede (NWK) e a *framework* para a camada de aplicação (AP). As duas camadas mais baixas são a camada física (PHY) e a camada de acesso ao meio (MAC). A camada PHY é responsável pela transmissão e receção de mensagens através do canal físico, deteção de energia, indicação da qualidade da ligação e seleção do canal de transmissão. A camada MAC controla o acesso aos canais, utiliza mecanismos de prevenção de colisões (CSMA-CA), especifica o tipo de dispositivo permitidos, define a estrutura dos diversos tipos de pacotes e é responsável pela sincronização e transmissão dos pacotes *beacon*. A camada NWK é a responsável pela ligação dos dispositivos à rede, descoberta e configuração de novos dispositivos, atribuição de endereços aos coordenadores da PAN, implementação dos mecanismos de descoberta de rotas e encaminhamento de informação. A camada AP é responsável pela gestão e suporte aplicacional.

O ZigBee usa quatro tipos de pacotes: os pacotes Beacon são usados para a sincronização e ativação dos nós, estando estes adormecidos até receber este pacote, por forma a economizar energia; os pacotes de Dados transportam os dados de forma fiável e sem erros graças à sequência de *frame-check*; os pacotes ACK são usados para confirmar a receção dos pacotes pelo destinatário; os pacotes MAC servem para configurar e controlar os nós da rede [24][31][33].

Dois projetos de destaque onde foi implementado este protocolo, o “Siemens APOGEE” é um projeto que tem como objetivo tornar os edifícios mais inteligentes e mais eficientes. Além de disponibilizar também controla toda a informação sobre grande parte dos recursos que são usados pelos edifícios ou empresas, controlando desde os sistemas de climatização aos sistemas de iluminação [34].

O “Philips HUE” é outro projeto que usa o modelo de comunicação ZigBee. Este projeto consiste no controlo da iluminação, intensidade e cor, através de um *smartphone*. Este sistema está atualmente no mercado a um reduzido custo, disponível para residências e empresas [35].

### 3.1.2 ANT

Embora seja um *software* proprietário, o protocolo ANT tem duas características fundamentais para o seu sucesso, o reduzido baixo consumo energético e a sua flexibilidade de adaptação a diferentes topologias de rede, este protocolo funciona na mesma frequência que o *Bluetooth Low Energy* (BLE), nos 2.4GHz.

Este protocolo tem uma elevada eficiência, devido à possibilidade de colocar os nós em modo “*sleep*”, durante os períodos em que não há transmissões de dados. Dependendo da topologia da rede, os nós podem ser transmissores, recetores ou transmissores/recetores e são também capazes de determinar qual a melhor altura para transmitir os dados baseando-se na atividade dos seus nós vizinhos. O ANT suporta três tipos de mensagens, *broadcast*, *acknowledged* e *burst*. Em *broadcast* a comunicação é feita apenas num sentido, de um nó para outro e o nó recetor não envia nenhuma confirmação de receção. Em *acknowledged*, o recetor informa o transmissor se a mensagem foi recebida com sucesso ou se falhou, mas não há possibilidade de retransmissões em caso de falha. Em *burst* já há retransmissão de pacotes caso o recetor informe

o transmissor para tal, devido à numeração sequencial dos pacotes. Assim, estes diferentes tipos de transmissão de dados dão uma grande vantagem para a adaptabilidade deste protocolo a diferentes necessidades e recursos [36].

### 3.1.3 SPIN

O protocolo *Sensor Protocols for Information via Negotiation* (SPIN) pertencente à categoria *Data-Centric* e tem como objetivo disseminar de forma eficiente a informação recolhida para todos os sensores nó da rede. Quando a informação recolhida é transmitida para outro nó é usado um processo de descrição dos dados (meta-dados), o processo de negociação de meta-dados faz com que seja eliminada a transmissão de dados redundantes, ou seja, primeiro os nós negociam usando os descritores dos dados, depois aprovam ou descartam a transmissão, com a redução da transmissão de dados redundantes há mais largura de banda disponível na rede.

Este protocolo usa três tipos de mensagem, ADV, REQUEST e DATA. A primeira transmissão é uma mensagem ADV que transporta informação sobre os dados que estão disponíveis para transmissão, a mensagem ADV descreve o seu tamanho, conteúdo e requisitos. Após um nó receber a mensagem ADV, verifica se os dados são duplicados e se tem energia suficiente para os retransmitir, se o nó tiver interesse nos dados responde com uma mensagem REQUEST a solicitar os dados. Após um nó receber a mensagem REQUEST, este envia uma mensagem DATA com os dados.

Da família dos protocolos SPIN destacam-se, o SPIN-PP e o SPIN-EC otimizados para redes ponto-a-ponto, o SPIN-BC e o SPIN-RL otimizados para transmissões broadcast. Comparado a outros protocolos semelhantes, o SPIN é capaz de entregar mais 60% de dados com a mesma energia em redes ponto-a-ponto e mais 80% de dados em redes broadcast [16][37][38].

### 3.1.4 LEACH

O protocolo *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) pertencente à categoria dos protocolos Hierárquicos. É baseado em grupos de nós (*cluster*) e utiliza rotação aleatória das estações base (*cluster-heads*) do *cluster* local, os nós vão decidir qual será a sua estação base (*cluster-head*) com base no menor custo de comunicação, ou seja, vai escolher o *cluster-head* que estiver mais perto. Desta forma é possível distribuir uniformemente o consumo de energia entre os sensores na rede. Após um ciclo de rotação da estação base é agendado o TDMA para as transmissões permitindo que os nós possam desligar as suas interfaces no tempo em que não vão ser usados. O *cluster-head* é o responsável pela seleção e agregação dos dados, evitando redundância e envia os dados para o nó *sink* [9][16][39].

### 3.1.5 Outros Protocolos

O protocolo *Sensor Medium Access Control* (S-MAC), da camada de enlace de dados, usa alocação dinâmica de canal e sincronização de ciclos de funcionamento com os nós vizinhos, permitindo que os nós desliguem os seus rádios para reduzirem o consumo de energético. Este protocolo destina-se a redes com reduzidas taxas de envio de mensagens, redes com aplicações orientadas a eventos e com fluxo de dados *broadcast* ou *unicast* [9][16].

O *Directed Diffusion* (DD) pertencente à categoria *Data-Centric*, tem como objetivo poupar o máximo de energia possível. Este protocolo reduz ao máximo a interação entre nós e a troca de mensagens, tem a capacidade de entregar dados em *multipath* e os nós podem agregar dados. Este protocolo usa um sistema de pares de atributo/valor para pedir determinada informação, ou seja, o nó *sink* pode enviar uma mensagem em broadcast a pedir dados aos nós que estão na área localizada em  $[(x_1,y_1),(x_2,y_2)]$  ou pedir dados aos nós que têm

informação sobre temperaturas, em qualquer caso, só os nós que têm a informação pedida é que respondem [9][16].

O protocolo *Small Minimum Energy Communication Network* (SMECN) é uma melhoria do *Minimum Energy Communication Network* (MECN). Neste protocolo, todos os sensores descobrem os seus vizinhos com o envio de mensagens de descoberta. Com estas mensagens os sensores determinam um caminho mínimo de energia entre eles, ou seja, de todos os caminhos possíveis, este determina o caminho que tem o menor custo a nível de consumo energético. O objetivo deste protocolo é conhecer a localização de todos os nós vizinhos e o custo energético entre os nós e os seus vizinhos [28][40][41].

O *Geographical and Energy Aware Routing* (GEAR) calcula o custo de envio de dados em função da distância e energia residual dos nós que fazem parte do menor caminho entre o nó e o destino dos dados. Este cálculo é feito sempre que é enviado um pacote para uma região, por forma a ter sempre um endereçamento atualizado das várias regiões. Como este protocolo tem informação sobre todas as rotas é-lhe possível determinar sempre qual a rota mais eficiente e ainda é compatível com RSSF compostas por nós móveis [42][43].

O *Sequential Assignment Routing* (SAR) foi o primeiro a implementar QoS na escolha de rotas, por forma a garantir um melhor aproveitamento da energia e também tolerância a falhas. Além de atribuir níveis de prioridade aos pacotes, também identifica caminhos em árvore de um salto, do nó *sink* para os nós sensores vizinhos tendo em conta o custo de energia e o atraso em cada caminho. Desta forma podem ser escolhidos os melhores caminhos tendo em conta a prioridade dos pacotes e a métrica de QoS usada nos diferentes caminhos. Com a atribuição de prioridade aos pacotes este protocolo consegue

garantir um menor consumo energético que alguns protocolos criados especificamente para garantir baixos consumos de energia [44][45].

O *Event-to-Sink Reliable Transfer* (ESRT) foi criado para a camada de transporte nas RSSF e baseia-se em eventos que aumentam a fiabilidade e controlam o congestionamento de dados na rede. Com base no número de mensagens recebidas pela estação base, os eventos podem ser considerados confiáveis ou não, assim, com a relação entre a percentagem de pacotes recebidos com sucesso por determinado tempo e a frequência da transmissão de mensagens, o protocolo ajusta a taxa de envio de dados de cada nó para que a taxa de pacotes recebidos pela estação base resulte num evento confiável. Para medir o congestionamento dos nós, é analisado o tamanho dos pacotes a serem enviados, se estes ultrapassarem o tamanho pré-definido o nó envia essa informação à estação base. Com base nestes mecanismos o protocolo é capaz de garantir uma taxa de confiabilidade próxima dos 100% e reduzir ao máximo o envio de mensagens. Tem um consumo de energia bastante reduzido em todos os nós à exceção do nó *sink*, que é o único responsável pelo processamento do algoritmo ESRT [16][46].

O protocolo *Pump Slowly, Fetch Quickly* (PSFQ) tem como objetivo identificar perdas de dados e adaptar-se a diferentes condições da rede. Se a rede tem um reduzido número de falhas a transmissão de dados processa-se normalmente, caso haja um maior número de falhas o protocolo altera o seu comportamento para o modo *store and forward*. Para identificar perdas de dados o emissor envia os dados em fragmentos numerados, todos os nós por onde passam os dados guardam em cache a informação dos dados, assim o recetor pode notificar se a receção dos dados foi concretizada com sucesso ou pedir que lhe sejam reenviados os fragmentos de dados perdidos [16][47].

## 3.2 Classificação de Protocolos

Nas RSSF existe grande diversidade de protocolos com características e capacidades bastante variadas, assim, devido a diferentes pontos de vista e interesses é possível classificar de várias formas os protocolos de encaminhamento.

Uma classificação comum para os protocolos é o seu tipo de comunicação, *node-centric*, *data-centric*, *geo-centric* ou *QoS-based*. Os protocolos *node-centric* são comuns nas redes *ad-hoc*, onde o destino dos dados é baseado em nós com endereços ou identificadores. No caso das RSSF o mais comum são *data-centric*, *geo-centric* e *QoS-based*. No caso dos *data-centric* o nó *sink* envia consultas para diferentes regiões e fica a aguardar as respostas com os dados. As propriedades dos dados são especificadas com nomes. Em *geo-centric* os nós sabem onde estão localizados geograficamente e podem usar esta informação para melhorar do desempenho da rede. Os protocolos baseados em *QoS* têm como objetivo implementar qualidade de serviço para um menor consumo energético, menor latência e aumentar a taxa de entrega de dados.

Os protocolos podem ser também classificados com base na sua arquitetura de rede e o seu modo de operação hierárquica ou plana. Numa topologia em que os nós tenham um modo de operação plana, todos os nós são tratados da mesma forma, quando um nó tem de enviar dados, este procura uma rota que normalmente necessita de vários saltos até chegar ao nó *sink*. Numa topologia em que os nós tenham um modo de operação hierárquica, normalmente os nós são agrupados e cada *cluster-head* é responsável pela agregação dos dados recolhidos pelos nós da sua região (Tabela 3).



Protocolos	Topologia / Comunicação	Uso de energia	Agregação de Dados	Escalabilidade	Baseado em consultas	Overhead	Modo de recolha de Dados	QoS
ZigBee	Hierárquico	Baixo	Sim	Bom	Sim	Baixo	Por pedido	Não
ANT	Flat / Data-centric	Baixo	Sim	Bom	Sim	Baixo	Por pedido	Não
SPIN	Flat / Data-centric	Baixo	Sim	Limitada	Sim	Baixo	Acionado por eventos	Não
LEACH	Hierárquico / Node-centric	Alto	Sim	Bom	Não	Alto	Cluster-head	Não
DD	Flat / Data-centric	Baixo	Sim	Limitada	Sim	Baixo	Por pedido	Não
SMECN	Hierárquico	Alto	Não	Limitada	Sim	Alto	Por pedido	Não
GEAR	Localização	Baixo	Não	Limitada	Não	Moderado	Por pedido	Não
SAR	Localização / Data-centric	Alto	Sim	Limitada	Sim	Alto	Continuado / Periódico	Sim
ESRT	Data-centric	Baixo	Sim	Limitada	Sim	Baixo	Acionado por eventos	Sim

Tabela 3 - Comparação de Protocolos [48]

## 4 Simulação e Casos de Estudo

O crescimento constante do número de estudos e implementações das RSSF influencia diretamente o crescimento do número de ferramentas de simulação e *frameworks* que dão apoio ao desenvolvimento de RSSF.

A seleção de um sistema de simulação é uma tarefa que necessita de uma análise prévia porque, tal como bastantes protocolos foram desenvolvidos com objetivos específicos, os sistemas de simulação também foram desenvolvidos para dar resposta a determinados objetivos, protocolos e níveis de complexidade de cenários. De seguida são identificadas e caracterizadas algumas das mais populares ferramentas para simulação de RSSF.

### 4.1 Simuladores e Emuladores

NS-2, é um dos mais populares simuladores de redes não específicas, desenvolvido em C++, tem suporte para diversos protocolos em todas as camadas sobre diferentes tipos de infraestruturas de rede. O NS-2 é um simulador de eventos discretos, inclui protocolos específicos para RSSF, como DD ou SMAC. Usa OTcl (Object Tcl) para configuração e *interface* de *script*. Uma desvantagem do NS-2 é o seu pobre suporte gráfico [49].

Riverbed Modeler (OPNET), permite simular o comportamento e desempenho de quase todos os tipos de rede, num ambiente gráfico intuitivo e simples. Com este simulador é possível configurar parâmetros em todas as camadas do modelo OSI. Para as RSSF disponibiliza suporte para o protocolo ZigBee, onde é possível configurar bastantes parâmetros nas diferentes camadas deste protocolo de RSSF.

OMNeT ++ é um simulador de eventos discretos implementado em C++, para redes de comunicações, multiprocessadores e sistemas distribuídos ou paralelos. As principais capacidades deste simulador são o suporte para simulações de grande escala com componentes reutilizáveis, proporcionar acompanhamento visual e modo de *debug* para as simulações, garantir um sistema de simulação modular e configurável e facilitar a intercomunicação de dados e ficheiros com outras aplicações [50].

J-Sim, é um simulador desenvolvido em Java, baseado em componentes. Com o J-Sim é possível acompanhar a simulação em tempo real, suporta um número considerável de protocolos, tem um simulador de RSSF bastante detalhado. Tem como princípio de funcionamento a reutilização de modelos e disponibiliza modo de *debug* [51].

ATEMU emulador é uma ferramenta personalizável, que permite suportar diferentes plataformas de *hardware* para simulação de redes. O sistema permite a definição de diferentes parâmetros para cada nó. É compatível com o módulo MICA2, sendo capaz de emular o seu processador, a *interface* de rádio, temporizadores, entre outros e também capaz de executar o sistema operativo TinyOS. O ATEMU vem com XATDB, um depurador gráfico que suporta a definição de pontos de interrupção, mostra valores de variáveis, o estado de periféricos, etc. A plataforma suporta a especificação de configuração baseada em arquivos XML, definindo a configuração de *hardware* e *software*, juntamente com a localização física de cada nó [52].

NetTopo, permite a visualização da topologia da rede e controlo das propriedades dos nós seleccionados. O simulador foi desenvolvido para simplificar o estudo de vários algoritmos de RSSF. Disponibiliza módulos de

representação e de controlo, programação, de encaminhamento ou para algoritmos de *clustering*. Dois algoritmos de encaminhamento implementados neste simulador são o TPGF e GPSR. Os sensores podem ser implementados em diferentes tipologias de rede. Tem a ferramenta Visualizer incorporada, que permite analisar dados e informação sobre os processos que ocorrem nas simulações [46].

SENSE, foi projetado para ser um simulador de RSSF eficiente e fácil de usar. O seu funcionamento baseia-se em três princípios: extensibilidade, reutilização e escalabilidade. Funciona sobre uma arquitetura orientada a objetos, o uso de componentes torna as simulações mais facilmente extensíveis. Os componentes declarados como classes facilitam a sua reutilização em várias simulações [53].

TOSSIM é um simulador para RSSF que opera sobre o sistema operativo TinyOS. Tem incluídos modelos padrão muito simplistas, mas permitindo também modelos de complexidade significativa. Fornece vários mecanismos para interagir com a rede, monitorização de tráfego de pacotes e permite o uso de diversas ferramentas de depuração. Juntamente com a interface gráfica TinyViz, o utilizador tem a possibilidade de visualizar, monitorizar, controlar e depurar a execução de simulações [54].

## **4.2 Escolha do Simulador**

A simulação é usada para comparar desempenhos, testar e explorar diversas formas e possibilidades de técnicas e cenários nas RSSF. Assim, para escolher o sistema de simulação mais adequados é necessário ter em conta algumas propriedades dos sistemas [55].

Reutilização e disponibilidade: o sistema tem proporcionar aos utilizadores interfaces simples e baseadas em módulos, reutilizáveis, para o utilizador poder adicionar e alterar funcionalidades de uma forma simples. Disponibilizar modelos prontos a usar para os utilizadores poderem criar rapidamente cenários de simulação.

Desempenho e escalabilidade: são talvez as principais características a ter em conta. Normalmente o desempenho depende da eficácia da linguagem de programação. A escalabilidade depende principalmente dos requisitos armazenamento de memória e processamento, porque, quanto mais complexa for a simulação, mais recursos são necessários.

Suporte para linguagens de programação semanticamente ricas: as linguagens de programação têm impacto direto no nível de dificuldade de definição de características das simulações e para a análise e tratamento de resultados.

Suporte gráfico, modo de depuração e análise passo-a-passo: a representação gráfica das simulações é uma característica fundamental, a capacidade de inspecionar módulos, variáveis e filas de eventos em tempo real e passo-a-passo permite mais facilmente, detetar e corrigir problemas nas simulações.

Evolução, acompanhamento das tecnologias e compatibilidade com sistemas operativos. São pontos fundamentais na escolha do simulador, alguns deles já deixaram de ter suporte e cabe aos utilizadores desenvolver soluções para estes simuladores darem alguma compatibilidade com os sistemas operativos e com as soluções que desejam implementar. A própria especificidade das RSSF e respetivos protocolos também dificultam o desenvolvimento de ferramentas capazes de suportar e acompanhar a evolução nas RSSF.

### 4.3 Metodologia

Após analisar diferentes protocolos e testar alguns simuladores, a tarefa de escolher um ambiente de simulação revela-se mais simples. Garantir uma simulação capaz de representar um exemplo concreto de uma situação real, com o maior nível de detalhe possível ao nível das configurações do protocolo e que também permita responder com uma representação de vários tipos de resultados, é um exemplo sólido a transmitir.

Para simular e comparar diferentes cenários em diferentes topologias de rede foi escolhido o simulador Riverbed Modeler Academic Edition 17.5 e o protocolo ZigBee. Este simulador é provavelmente um dos melhores para representar uma RSSF com o protocolo ZigBee. Com este simulador é possível representar e configurar o coordenador, *router* e sensor, os três tipos de nós usados numa rede ZigBee. Além disso também permite a configuração de parâmetros do tráfego, da camada física, da camada MAC, entre outros.

O objetivo destas simulações será comparar os resultados de latência, taxa de transmissão, carga da rede, dados ignorados e valores de dados enviados e recebidos, nos diferentes cenários em diferentes topologias.

## 4.4 Cenários

Os cenários vão representar quatro situações distintas de casos reais onde podem ser usadas RSSF. Cada um dos cenários será testado numa topologia em árvore, malha e estrela. Os cenários representam casos com necessidade de transmitir diferentes quantidades de dados (Tabela 4).

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
	Transferência de fotografias	Transferência de fotografias	Transferência de medições de direção de vento	Transferência de medições de temperatura
Dados a transmitir em 5 minutos	Uma fotografias a cores com 640x480 a cada 120 segundos (18874368 bits)	Uma fotografias em escalada cinza com 640x480 a cada 60 segundos (2457600 bits)	Uma medição a cada 0,1 segundo (64 bits)	Uma medição a cada 30 segundos (48 bits)
Quantidade de dados	157286 bits/s	40960 bits/s	640 bits/s	1,6 bits/s

Tabela 4 - Cenários de simulação

A quantidade de dados a transmitir foi calculada com base no tamanho real dos diferentes tipos de informação. Uma fotografia de 640x480 a cores tem cerca de 2,25 MegaBytes (18874368 bits), uma fotografia de 640x480 em escala cinza tem cerca de 0,3 MegaBytes (2457600 bits), uma medição de vento de um anemómetro digital necessita de cerca 64 bits para transmitir a velocidade em metros por segundo e orientação do vento em graus, a temperatura pode ser transmitida com 48 bits.

Na tabela 5 estão descritos os principais parâmetros de configuração para cada um dos cenários nas diferentes topologias.

	Topologia em Malha	Topologia em Árvore	Topologia em Estrela
Nº de Coordenadores	1		
Nº de Routers	5	3	1
Nº de Sensores	2	2	2
Dimensões da rede	200m X 200m		150m X 150m
Tempo de simulação	5 minutos		
ACK Status	Desativo		
Largura de banda da rede	256000 bits (taxa de transferência padrão)		
Intervalo de tempo entre transmissão de pacotes	1 segundo		
Destino dos pacotes	Todos os routers	1 router	1 router
Banda de Transmissão	2450 MHz		
Nível de potência de transmissão	0,05 Watt		
Rádio Potência	-85 dBm		

Tabela 5 - Parâmetros de configuração dos cenários



As figuras 5, 6 e 7 representam os cenários de cada uma das topologias, a organização dos nós e as respetivas ligações entre eles.

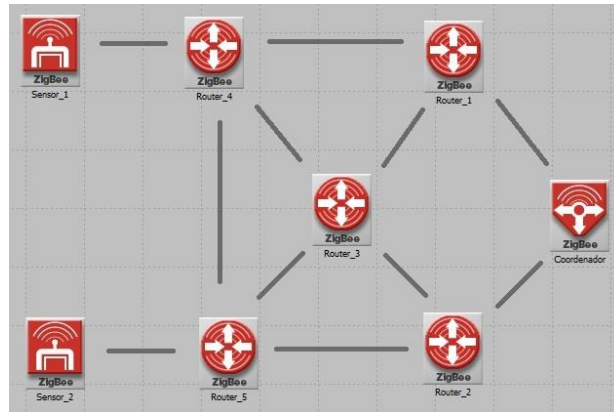


Figura 5 - Cenário da topologia em malha

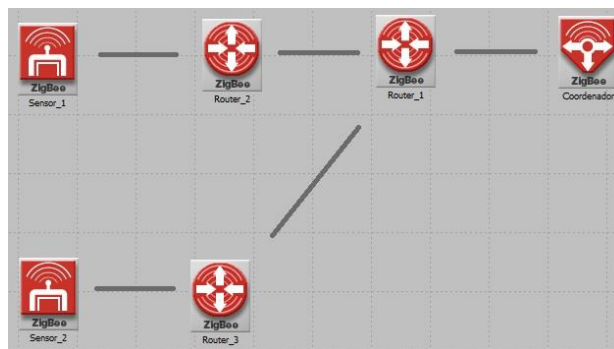


Figura 6 - Cenário da topologia em árvore

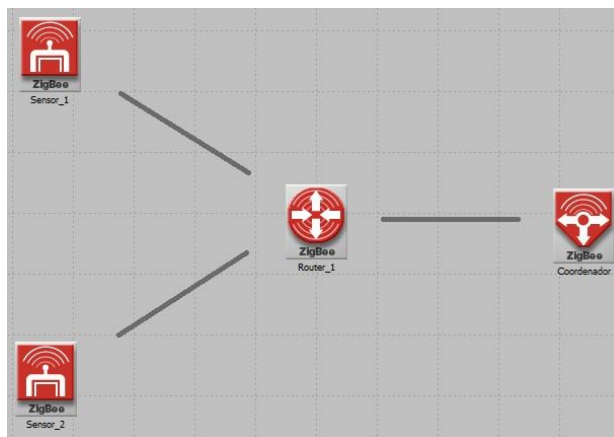


Figura 7 - Cenário da topologia em estrela

## 4.5 Testes

De seguida são apresentados os resultados dos testes e análise do desempenho nas diferentes topologias. Os testes incidem sobre algumas das métricas usadas para quantificar o desempenho de comunicações em redes.

### 4.5.1 Latência fim-a-fim

A latência fim-a-fim mede o intervalo de tempo entre o momento em que o pacote de dados é indicado para transmissão na camada física e a receção do último bit do pacote no nó recetor dentro da PAN. As figuras 8, 9, 10 e 11 representam a latência de cada um dos cenários testados nas diferentes topologias de rede.

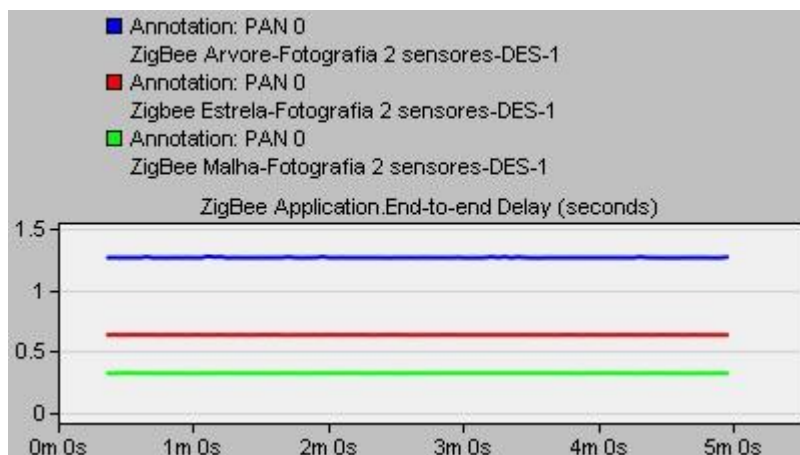


Figura 8 - Latência fim-a-fim, transferência de fotografias a cores

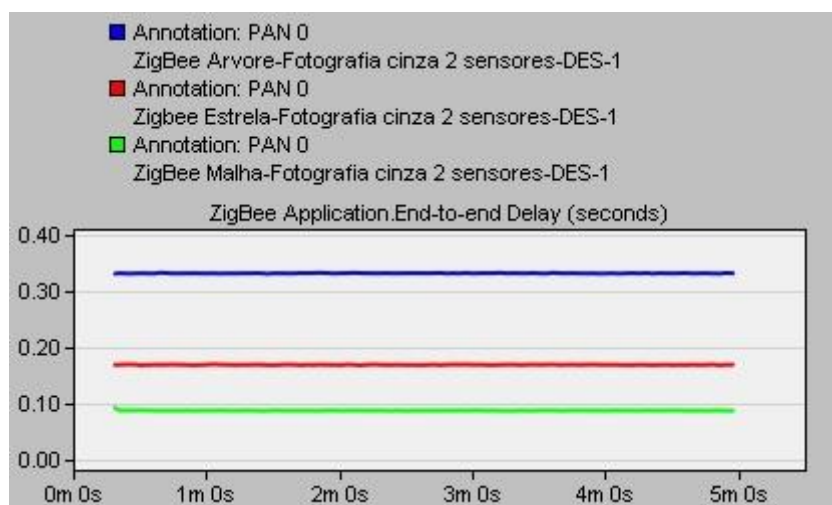


Figura 9 - Latência fim-a-fim, transferência de fotografias cinza

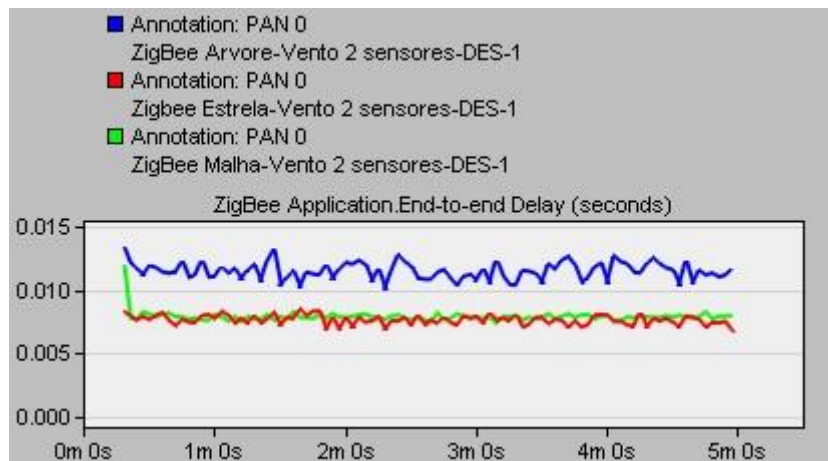


Figura 10 - Latência fim-a-fim, transferência de medições de vento

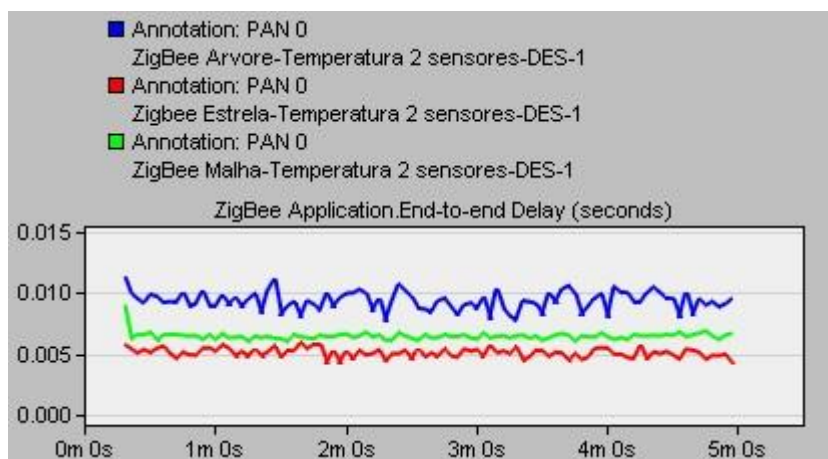


Figura 11 - Latência fim-a-fim, transferência de medições de temperatura

Todos os resultados apontam para uma maior latência na topologia em *Árvore*. Os valores da latência para a topologia em *Estrela* e *Malha*, sempre notoriamente melhores, vão-se aproximando, à medida que a quantidade de dados a transmitir vai diminuindo, começando por haver uma maior latência na topologia em *Estrela* e menor na *Malha* para maiores quantidades de dados e para menores quantidades de dados, passa a topologia em *Malha* a ter maior latência.

Estes resultados demonstram que tanto a simplicidade da estrutura de rede, como a possibilidade de rotas alternativas, oferecem menor latência que uma estrutura hierárquica como a *Árvore*.

## 4.5.2 Dados ignorados

Dados ignorados pela camada MAC devido a falhas de transmissões ou retransmissões. Estes valores correspondem ao número de pacotes das camadas superiores que são ignorados porque a camada MAC não recebe mensagens ACK para retransmitir os respectivos pacotes ou fragmentos, ou o número de retransmissões atinja o limite máximo (Figuras 12, 13, 14 e 15).

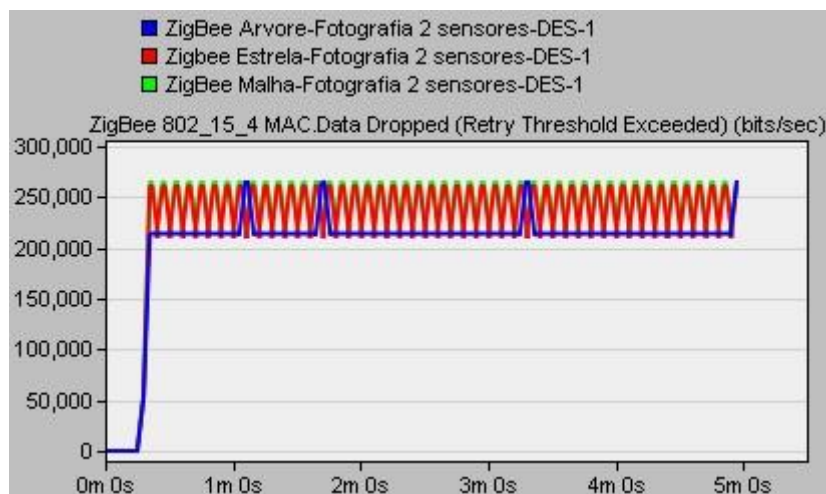


Figura 12 - Dados ignorados, transferência de fotografias a cores

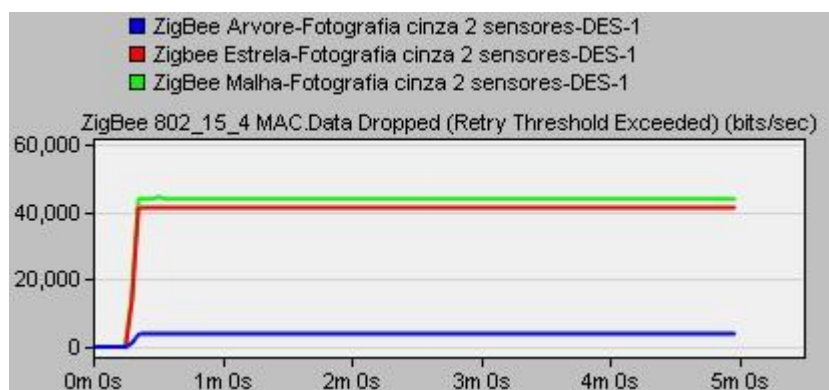


Figura 13 - Dados ignorados, transferência de fotografias cinza

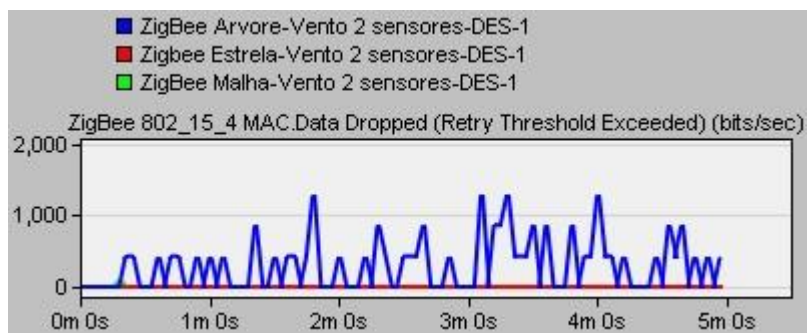


Figura 14 - Dados ignorados, transferência de medições de vento

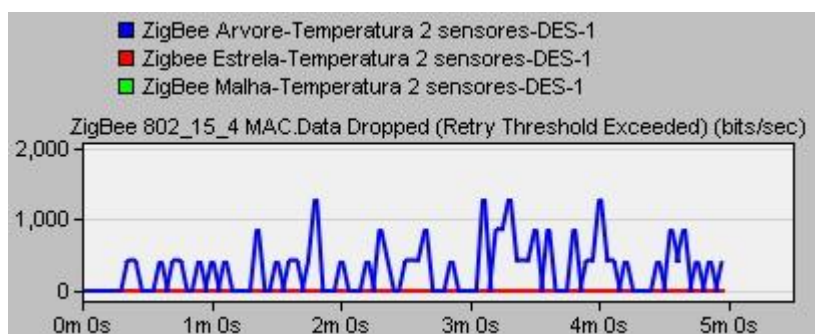


Figura 15 - Dados ignorados, transferência de medições de temperatura

Para uma rede com débito máximo de 250 kb/s, a simulação de transferência de fotografias a cores com um total de cerca 320 kb/s é claramente uma sobrecarga, uma quantidade de dados que não pode ser entregue no mesmo espaço de tempo. No caso da simulação de transferência de fotografias de baixa qualidade com cerca de 82 kb/s gerados pelos sensores, também são ignorados cerca de metade dos dados transmitidos mas apenas nas topologias em estrela e malha, já a topologia em árvore consegue manter um reduzido valor de dados ignorados que vai manter mesmo no caso das transmissões de medições de vento e temperatura ao contrário das topologias em estrela e malha que nestes casos têm um valor de 0 kb/s de dados ignorados, ou seja, não houve falhas de transmissões ou retransmissões de dados.

### 4.5.3 Carga

Carga, total de bits/s enviados para a camada MAC pelas camadas superiores, de todos os nós da rede (Figura 16, 17, 18 e 19).

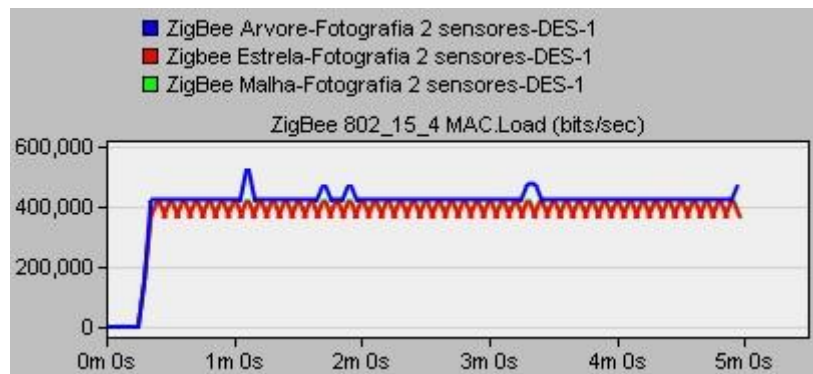


Figura 16 - Carga para transferência de fotografias a cores

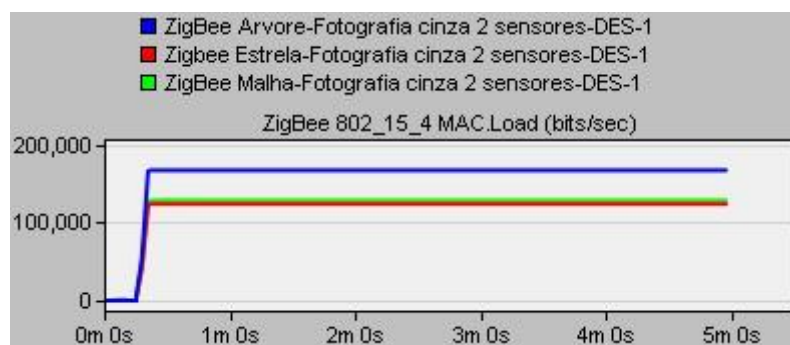


Figura 17 - Carga para transferência de fotografias cinza

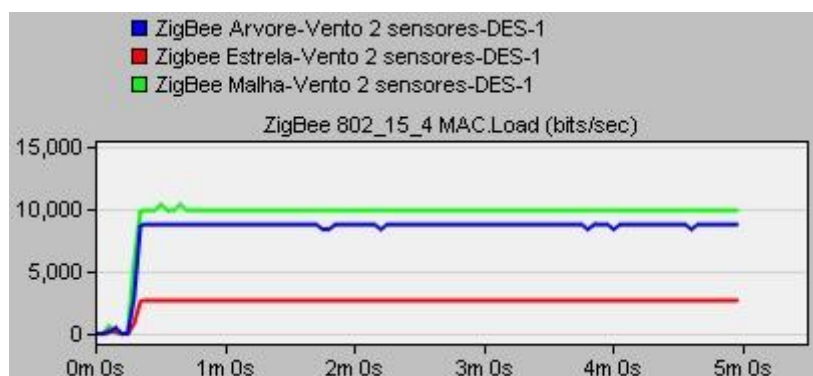


Figura 18 - Carga para medições de vento

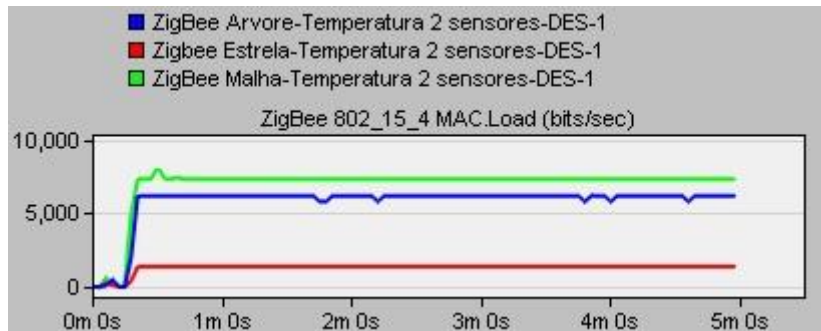


Figura 19 - Carga para medições de temperatura

A carga na rede aumenta principalmente com a complexidade das topologias e com o número de nós, daí haver uma clara diferença de valores nas simulações com menor transferência de dados entre as topologias Árvore/Malha e Estrela.

#### 4.5.4 Taxa de Transferência

Taxa de transferência, número total de bits/s transmitidos corretamente pela camada MAC para as camadas superiores. A taxa de transferência da rede depende de fatores como a topologia, colisão de pacotes e obstrução de nós (Figuras 20, 21, 22 e 23).

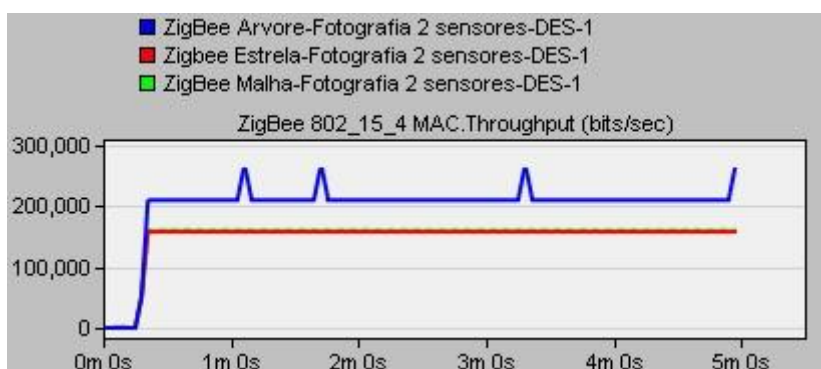


Figura 20 - Taxa de transferência para fotografias a cores

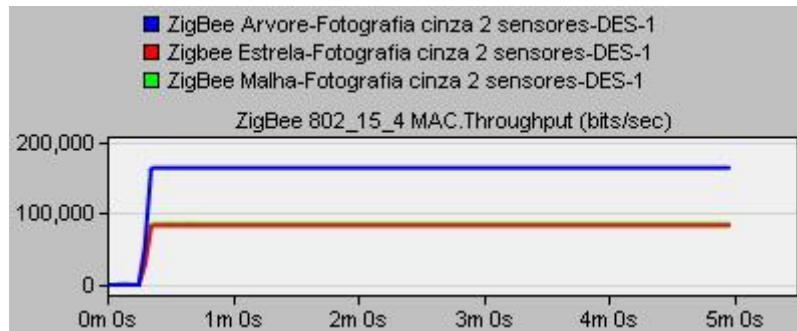


Figura 21 - Taxa de transferência para fotografias cinza

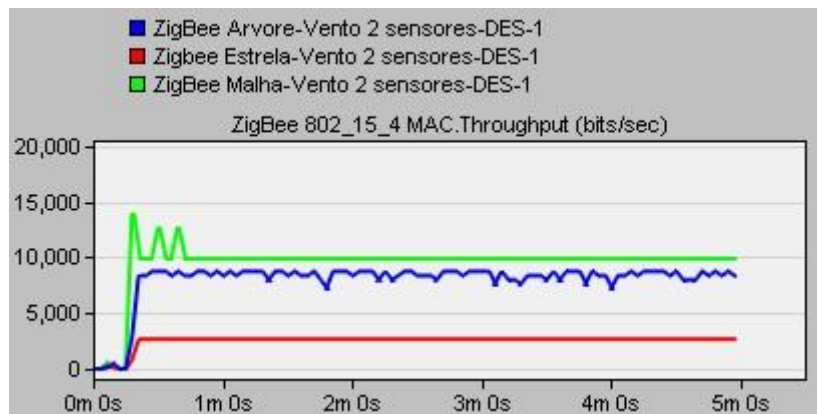


Figura 22 - Taxa de transferência para medições de vento

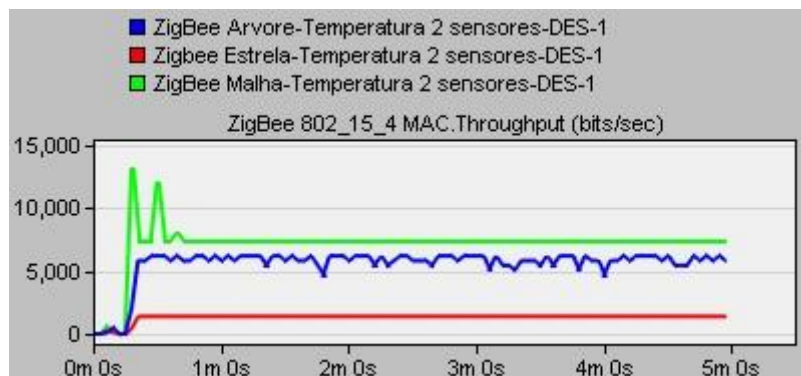


Figura 23 - Taxa de transferência para medições de temperatura

Para transmissões de grandes quantidades de dados, a topologia em árvore teve maior rendimento e nos cenários com menor quantidade de dados obteve o segundo maior rendimento, muito próximo da topologia em malha que obteve o maior. Ficando a topologia em estrela sempre com o menor



rendimento. Estes resultados devem-se principalmente ao fato de a topologia em árvore e em malha darem um melhor escoamento aos dados, devido a um maior número de encaminhadores de dados e rotas alternativas.

#### 4.5.5 Total de tráfego enviado e recebido

Total de tráfego em bits/s enviado e recebido pela camada de aplicação (Figuras 24 e 25).

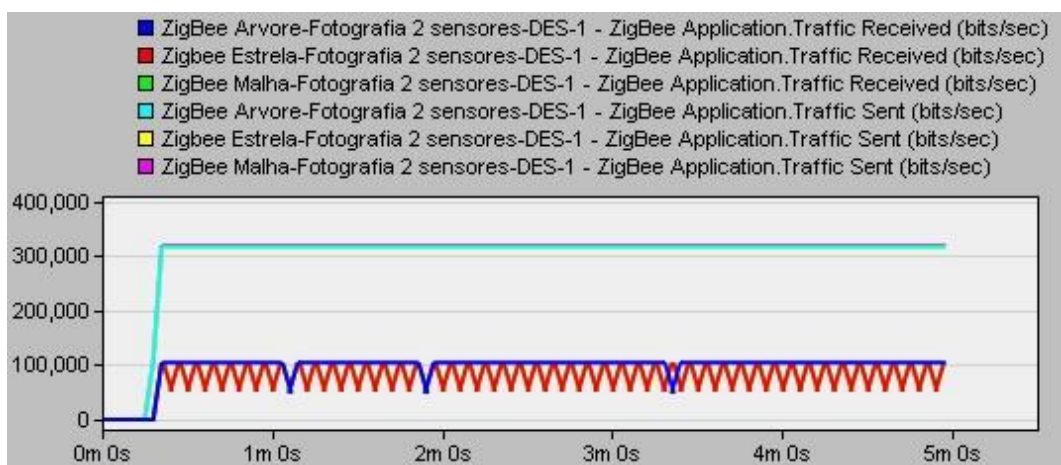


Figura 24 - Tráfego enviado e recebida com transmissão de fotografias a cores

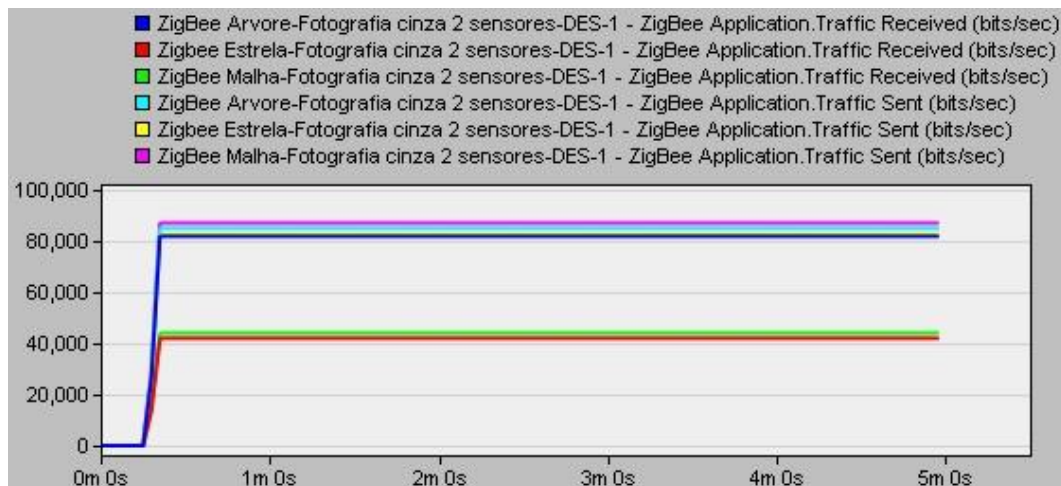


Figura 25 - Tráfego enviado e recebida com transmissão de fotografias cinza

Os resultados da simulação demonstram a dificuldade de gestão de elevadas quantidades de dados e para valores na ordem dos 80000 bits/s apenas

a topologia em árvore é capaz de atingir valores aproximados quer para o envio quer para a receção de dados.

Como é possível verificar pela figura 26 e 27, para as simulações de reduzidas quantidades de dados, é possível verificar que a quantidade de dados enviados e recebidos é praticamente a mesma, na topologia em Malha e Estrela as quantidades são tão semelhantes que é difícil distinguir a sobreposição na escala apresentada. Estes dados revelam que as redes são capazes de gerir estas quantidades de dados sem dificuldade. A diferença clara das quantidades de dados enviados e recebidos nas diferentes topologias é devido ao número de nós *router* e às suas configurações padrão de transmissão de 1024 bits/s.

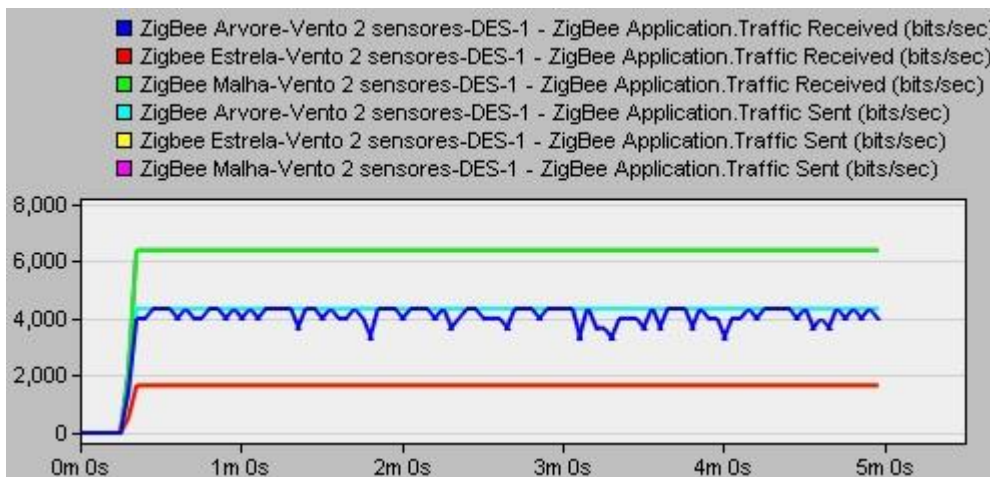


Figura 26 - Tráfego enviado e recebida com transmissão de medições de vento

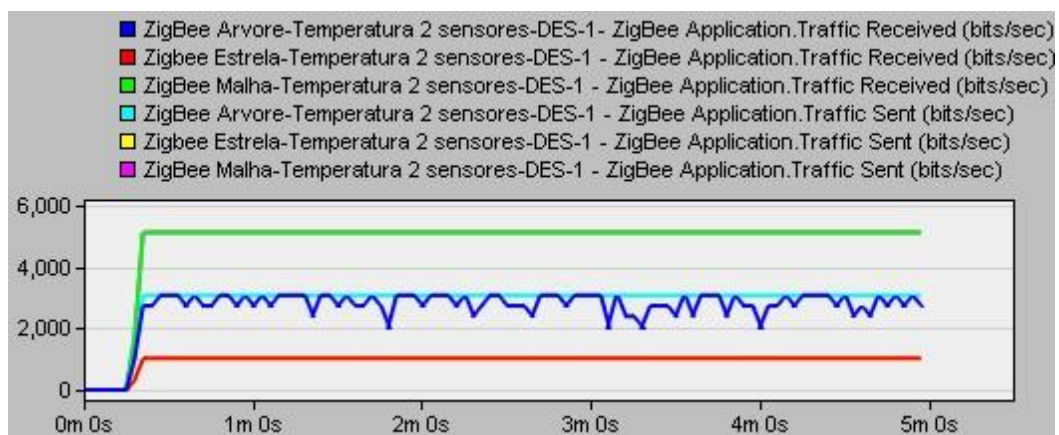


Figura 27 - Tráfego enviado e recebida com transmissão de medições de temperatura

## 4.6 Resultados Globais

Este caso de estudo teve como objetivo estudar o desempenho do protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee nas diferentes topologias de rede e o potencial do simulador *Riverbed Modeler*. Os valores da tabela 6 representam valores aproximados muito aproximados aos reais, obtidos nas simulações com o programa *Riverbed Modeler*.

	Cenário 1 (fotografias a cores)			Cenário 2 (fotografias cinza)			Cenário 3 (medições de vento)			Cenário 4 (medições de temperatura)		
	Árvore	Estrela	Malha	Árvore	Estrela	Malha	Árvore	Estrela	Malha	Árvore	Estrela	Malha
Latência (segundos)	1,27	0,63	0,32	0,34	0,17	0,09	0,0118	0,0079	0,008	0,0093	0,0051	0,0066
Dados Ignorados (bits/s)	210000	235000	260000	5000	40500	41000	500	0	0	500	0	0
Carga (bits/s)	410000	395000	400000	170000	123000	120000	8500	3000	10000	5800	1800	7400
Taxa de transferência (bits/s)	205000	160000	160000	160000	90000	90000	8000	2600	10000	5500	1900	7500
Tráfego enviado (bits/s)	310000	310000	310000	75000	75000	75000	4400	1900	6100	3050	1000	5100
Tráfego recebido (bits/s)	90000	70000	70000	75000	39000	39000	4100	1900	6100	2900	1000	5100

Verde: Melhor resultado; Laranja: Resultado Intermédio; Vermelho: Pior resultado.

Tabela 6 - Valores comparativos de simulações e topologias

A tabela 6 serve para, de uma forma visual, facilitar a análise e o entendimento dos resultados gerais de cada um dos cenários nas diferentes topologias. Nem sempre a diferença entre um melhor e pior resultado num determinado parâmetro, é significativa para poder eleger uma topologia sem considerar resultados de outros parâmetros. Nos casos dos cenários 3 e 4, onde os valores de tráfego são muito inferiores aos dos cenários 1 e 2, a comparação entre os resultados nas diferentes topologias, é feito com base na quantidade de tráfego transmitido, porque, é perceptível o tráfego de encaminhamento gerado pelos *routers*, como tal, os resultados não podem ser comparados diretamente entre as topologias, têm de ser com base na quantidade de tráfego transmitido em cada topologia.

Relativamente aos resultados de taxas de transferência, a topologia em *Árvore* obteve no geral melhores resultados, mesmo que para uma das duas transferências de menor quantidade de dados, não tenha obtido o melhor resultado, teve valores muito aproximados ao melhor resultado. A topologia em *Árvore* tende sempre a ter o maior nível de carga. Já a topologia em *Malha* obteve consistentemente o pior resultado. Para o cenário com o menor valor de dados transmitidos (1000 bits/s), entre todos, a topologia em *Estrela* obteve o melhor resultado.

Os resultados de carga na rede são normalmente contrários aos resultados da taxa de transferência, quando uma topologia tem melhor resultado de taxa de transferência tem o pior resultado de carga, embora os resultados de carga sejam próximos entre as diferentes topologias.

Os resultados da latência também são normalmente contrários aos da taxa de transferência, a maior latência pertence à topologia em *Árvore* e a menor latência à topologia em *Estrela*, para transferência de maior quantidade de dados. Para transferência de menor quantidade de dados, a topologia em *Malha* tem o melhor resultado e a topologia em *estrela* o pior.

Após a realização de vários testes com diferentes configurações e análise de outros trabalhos com redes ZigBee no simulador Riverbed Modeler, é possível concluir que este simulador tem grande potencial no que diz respeito à simulação de redes ZigBee, permite a configuração de bastantes parâmetros, essenciais para afinar o desempenho de uma rede com grande pormenor.

Um exemplo simples posto em prática foi a ativação do mecanismo ACK suportado pelo protocolo ZigBee. Este mecanismo é usado para confirmar a receção dos pacotes pelo destinatário. Na figura 26 há uma ligeira diferença entre a quantidade de dados recebidos e a quantidade de dados enviados na simulação de medições de vento com topologia em Árvore. Com o uso do mecanismo ACK foi possível obter uma quantidade de dados recebidos igual à quantidade de dados enviados na mesma simulação (figura 28). Este resultado refletiu-se também na quantidade de dados ignorados que passou a ser nula, quando na figura 14 (simulação com o mecanismo ACK desativo) havia uma ligeira quantidade de dados ignorados.

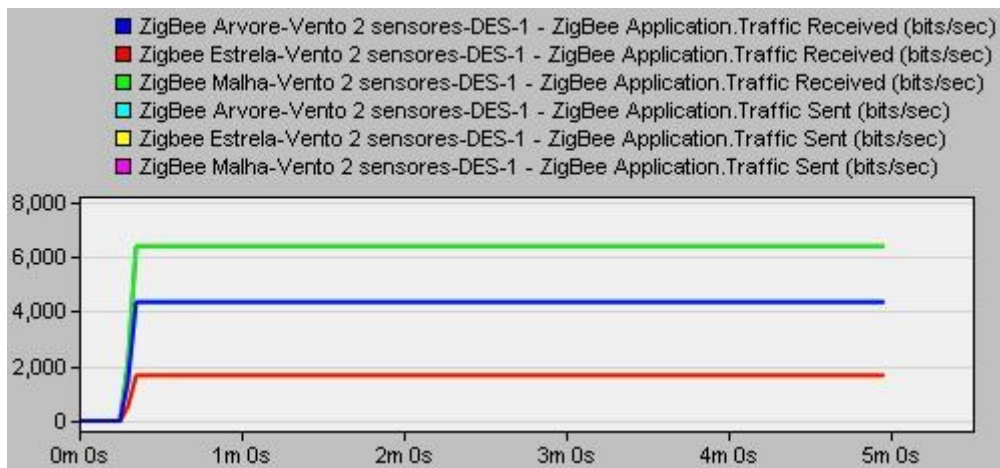


Figura 28 - Tráfego enviado e recebida com transmissão de medições de vento (ACK ativo)

# Conclusão

A utilização de redes de sensores sem fios continua em franco crescimento, ocorrendo em diversas áreas e por todo o globo. As principais características das RSSF estão em sintonia com as tendências e o caminho da evolução, a redução de consumos energéticos e a redução da dimensão de componentes eletrónicos. Por isso, a tendência será para esta área continuar a crescer, quer em número de projetos, quer em número de soluções para implementar ou mesmo novas tecnologias.

Tal como os protocolos usados nas redes TCP/IP, os protocolos que suportam o funcionamento das RSSF são essenciais para cumprir diferentes tarefas e objetivos. Existem várias formas de classificação dos protocolos de encaminhamento, sendo que uma das mais comuns assenta em três categorias, tendo estes diferentes modos de operação como *multipath-based*, *query-based*, *qos-based* ou *negotiation-based*: hierárquicos, de localização ou baseados em atributos.

Os protocolos hierárquicos oferecem boa escalabilidade, níveis muito eficientes de transmissão de dados, reduzidos consumos energéticos e agregação de dados, o que reduz significativamente a quantidade de mensagens transferidas pelos nós. A agregação de dados é uma das características mais apreciadas, pois permite otimizar o tráfego e poupar energia. De notar que esta característica não é exclusiva dos protocolos hierárquicos.

Os protocolos baseados em localização ou geográficos oferecem boa escalabilidade e mobilidade devido ao uso de tabelas de encaminhamento e envio de coordenadas com a sua localização para os nós vizinhos, o que permite evitar a necessidade de usar *broadcast* para descobrir rotas e enviar dados, reduzindo assim a taxa de ocupação na rede.

Relativamente aos protocolos baseados em atributos, estes fazem também uso da agregação de dados para eliminar a redundância, reduzir transmissões e consumos de energia. Os dados são requisitados com *queries* e é necessário identificar os dados com atributos. Este procedimento tem um inconveniente, que é a necessidade de processamento adicional.

A escolha por parte da aliança ZigBee de se basear na norma IEEE 802.15.4 foi sem dúvida um grande impulsionador para o seu sucesso, contribuindo para desenvolver este protocolo com objetivos concretos de forma a abranger características que poderiam dar resposta a diversos problemas e realidades. Algumas características como a configuração em diversas topologias, utilização de grande número de dispositivos, eficiência energética e funcionamento em diferentes frequências, despertaram muito interesse por este protocolo.

Como já foi referido anteriormente, o Riverbed Modeler é um excelente simulador para RSSF com protocolo ZigBee, além da grande variedade de parâmetros que podem ser configurados, também disponibiliza graficamente os resultados de várias métricas para diferentes camadas de rede e nós individuais. É talvez o simulador mais *user friendly*, com a desvantagem de não suportar outro protocolo para RSSF além do ZigBee.

É difícil eleger um ou outro protocolo para implementar uma rede de sensores sem fios. A escolha vai depender sempre das características mais adequadas para o projeto, o seu propósito e as condições do local onde este será implementado. O mesmo acontece com a utilização de simuladores, estes ajudam a ter uma melhor perceção e entendimento geral do funcionamento e implementação dos protocolos, a sua escolha vai depender do protocolo escolhido, devido à inexistência de uma plataforma onde possam ser simulados diversos protocolos.

No âmbito deste trabalho, foi criado um conjunto de cenários que, de alguma forma, descrevessem situações reais de utilização de RSSF. Com estes cenários foi possível testar as capacidades e potencialidades do protocolo

ZigBee juntamente com o *software* Riverbed Modeler, testar as suas capacidades de adaptação e desempenho em diferentes topologias. Assim, foram analisadas as métricas latência, dados ignorados, carga, taxa de transferência e quantidades de dados enviados/recebidos, para comparar o desempenho para cada uma das topologias de rede, árvore, estrela e malha.

Para os testes realizados, com as configurações e estruturas implementadas, os resultados obtidos atribuem à topologia em árvore um melhor desempenho geral. Para transmissão de grandes quantidades de dados, consegue dar um valor de taxa de transferência e dados ignorados muito melhor que as outras topologias. Para quantidades de dados reduzidas, apesar de as diferenças entre as diferentes topologias serem reduzidas, pode considerar-se que a topologia em malha e estrela obtêm melhores resultados que a topologia em árvore.

De notar que a topologia, a configuração e organização dos elementos ZigBee influenciam consideravelmente diversos parâmetros de comunicação. A instalação e operação de uma RSSF deve ser precedida do estabelecimento de objetivos e do levantamento de tipo e quantidade de tráfego de forma a seleccionar a topologia mais adequada.



# Referências Bibliográficas

- [1] M. Ibnkahla, *Wireless sensor networks: a cognitive perspective*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [2] G. Li, D. G. Zhang, K. Zheng, X. C. Ming, Z. H. Pan, e K. W. Jiang, «A Kind of New Multicast Routing Algorithm for Application of Internet of Things», *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 11, n. 4, pp. 578–585, Ago. 2013.
- [3] W. Dargie e C. Poellabauer, *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice*. Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, NJ: Wiley, 2010.
- [4] «Researchers Use NI LabVIEW and NI CompactRIO to Perform Environmental Monitoring in the Costa Rican Rain Forest - Solutions - National Instruments». [Em linha]. Disponível em: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-11143#>. [Acedido: 14-Out-2015].
- [5] «Wireless Sensor Networks to monitor food sustainability | Libelium». [Em linha]. Disponível em: [http://www.libelium.com/food\\_sustainability\\_monitoring\\_sensor\\_network](http://www.libelium.com/food_sustainability_monitoring_sensor_network). [Acedido: 14-Out-2015].
- [6] «Deploying an NI Wireless Sensor Network to Monitor Parking Garage Occupancy - Solutions - National Instruments». [Em linha]. Disponível em: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-12135#>. [Acedido: 14-Out-2015].
- [7] «UVA VigilNet: Home». [Em linha]. Disponível em: <https://www.cs.virginia.edu/wsn/vigilnet/>. [Acedido: 17-Out-2015].
- [8] L. M. P. L. de Brito e L. M. R. Peralta, «An Analysis of Localization Problems and Solutions in Wireless Sensor Networks», *Tékhne - Rev. Estud. Politécnicos*, n. 9, pp. 146–172, Jun. 2008.
- [9] H. Karl e A. Willig, *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- [10] H. D. Chinh e Y. K. Tan, *Smart wireless sensor networks*. Rijeka, Croatia: InTech, 2010.
- [11] H. M. Ammari, Ed., *The art of wireless sensor networks. Vol. 2: Advanced topics and applications*. Heidelberg: Springer, 2014.
- [12] S. K. Sarkar, T. G. Basavaraju, e C. Puttamadappa, *Ad hoc mobile wireless networks: principles, protocols, and applications*, 2. ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press/Auerbach, 2013.
- [13] H. M. Ammari, *Challenges and opportunities of connected k-covered wireless sensor networks: from sensor deployment to data gathering*. Berlin: Springer, 2009.
- [14] M. Guizani, H.-H. Chen, e C. Wang, *The future of wireless networks: architectures, protocols, and services*. 2015.

- [15] Linnyer Ruiz, Luiz Correia, Luiz Vieira, Daniel Macedo, Eduardo Nakamura, Carlos Figueiredo, Marcos Vieira, Eduardo Mechelane, Daniel Camara, Antonio Loureiro, José Nogueira, e Diógenes Jr., «Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fios», 2004.
- [16] K. Sohraby, D. Minoli, e T. F. Znati, *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2007.
- [17] S.-H. Yang, «Principle of Wireless Sensor Networks», em *Wireless Sensor Networks*, London: Springer London, 2014, pp. 7–47.
- [18] A. V. Fassio, «Um protocolo de múltiplas camadas para redes de sensores sem fio com baixo consumo de energia e latência reduzida», 2015.
- [19] R. Aquino-Santos, L. A. Villaseñor-González, V. Rangel Licea, O. Álvarez Cárdenas, e A. Edwards Block, «Performance analysis of routing strategies for wireless sensor networks», *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, n. 52, pp. 185–195, Mar. 2010.
- [20] S. Khan, A.-S. K. Pathan, e N. A. Alrajeh, *Wireless Sensor Networks: Current Status and Future Trends*. CRC Press, 2012.
- [21] S. Jaap, M. Bechler, e L. Wolf, «Evaluation of Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks in City Traffic Scenarios», em *in Proc of the 11th EUNICE Open European Summer School on Networked Applications, Colmenarejo*, 2005, pp. 584–602.
- [22] «TinyOS Documentation Wiki - TinyOS Wiki». [Em linha]. Disponível em: [http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/Main\\_Page](http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/Main_Page). [Acedido: 16-Out-2015].
- [23] «The ZigBee Alliance | Control your World». .
- [24] «ZigBee IP and 920IP | The ZigBee Alliance». .
- [25] «ANT / ANT+ Defined - THIS IS ANT». [Em linha]. Disponível em: <https://www.thisisant.com/developer/ant-plus/ant-antplus-defined/>. [Acedido: 21-Out-2015].
- [26] D. A. Gratton, *The Handbook of Personal Area Networking Technologies and Protocols*. Cambridge University Press, 2013.
- [27] C. Britton, *IT architectures and middleware: strategies for building large, integrated systems*. Boston, MA: Addison-Wesley, 2001.
- [28] C. Mascolo, L. Capra, e W. Emmerich, «Advanced Lectures on Networking», E. Gregori, G. Anastasi, e S. Basagni, Eds. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2002, pp. 20–58.
- [29] J. Radhika e S. Malarvizhi, «Middleware approaches for wireless sensor networks: an overview», *Int J Comput Sci*, n. 9, p. 6, 2012.
- [30] J. Hughes, J. Yan, e K. Soga, «DEVELOPMENT OF WIRELESS SENSOR NETWORK USING BLUETOOTH LOW ENERGY (BLE) FOR CONSTRUCTION NOISE MONITORING».
- [31] IEEE Computer Society, LAN/MAN Standards Committee, Institute of Electrical and Electronics Engineers, e IEEE-SA Standards Board, *IEEE*

- standard for local and metropolitan area networks. Part 15.4, Part 15.4.*, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [32] S. W. Nourillean, «A Study of ZigBee Network Topologies for Wireless Sensor Network with One Coordinator and Multiple Coordinators», *Tikrit J. Eng. Sci. TJES*, vol. 19, n. 4, pp. 64–80, Dez. 2012.
- [33] «ZigBee». [Em linha]. Disponível em: [http://www.gta.ufrj.br/grad/10\\_1/zigbee/padrao.html](http://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/zigbee/padrao.html). [Acedido: 21-Nov-2015].
- [34] «Siemens APOGEE». [Em linha]. Disponível em: <https://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/07/docs-07-5167-04-0mcg-siemens-zigbee-success-story.pdf>. [Acedido: 21-Nov-2015].
- [35] «Connected Lighting | The ZigBee Alliance». .
- [36] «ant-message-protocol-and-usage». [Em linha]. Disponível em: <https://www.thisisant.com/resources/ant-message-protocol-and-usage/>. [Acedido: 02-Nov-2015].
- [37] A. Perrig, R. Szewczyk, J. D. Tygar, V. Wen, e D. E. Culler, «SPINS: Security protocols for sensor networks», *Wirel. Netw.*, vol. 8, n. 5, pp. 521–534, 2002.
- [38] L. J. García Villalba, A. L. Sandoval Orozco, A. Triviño Cabrera, e C. J. Barenco Abbas, «Routing Protocols in Wireless Sensor Networks», *Sensors*, vol. 9, n. 11, pp. 8399–8421, Out. 2009.
- [39] Q. Liao e H. Zhu, «An energy balanced clustering algorithm based on LEACH protocol», em *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 341, pp. 1138–1143.
- [40] S. K. Makki, X.-Y. Li, N. Pissinou, S. Makki, M. Karimi, e K. Makki, *Sensor and Ad-Hoc Networks: Theoretical and Algorithmic Aspects*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [41] P. Krishnaveni e J. Sutha, «Analysis of routing protocols for wireless sensor networks», *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 2, n. 11, pp. 401–407, 2012.
- [42] D. Bhattacharyya, T. Kim, e S. Pal, «A Comparative Study of Wireless Sensor Networks and Their Routing Protocols», *Sensors*, vol. 10, n. 12, pp. 10506–10523, Nov. 2010.
- [43] S. K. Singh, M. . Singh, e D. K. Singh, «Routing Protocols in Wireless Sensor Networks - A Survey», *Int. J. Comput. Sci. Eng. Surv.*, vol. 1, n. 2, pp. 63–83, Nov. 2010.
- [44] T. Hara, V. I. Zadorozhny, e E. Buchmann, *Wireless Sensor Network Technologies for the Information Explosion Era*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [45] W. Y. Chang, *Network-Centric Service Oriented Enterprise*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [46] Y. Sankarasubramaniam, Ö. B. Akan, e I. F. Akyildiz, «ESRT: event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks», em *Proceedings of the 4th*

- ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, 2003, pp. 177–188.
- [47] C.-Y. Wan, A. T. Campbell, e L. Krishnamurthy, «PSFQ: a reliable transport protocol for wireless sensor networks», em *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, 2002, pp. 1–11.
- [48] R. V. Biradar, V. C. Patil, S. R. Sawant, e R. R. Mudholkar, «Classification and comparison of routing protocols in wireless sensor networks», *Spec. Issue Ubiquitous Comput. Secur. Syst.*, vol. 4, n. 2, pp. 704–711, 2009.
- [49] «The Network Simulator - ns-2». [Em linha]. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. [Acedido: 06-Dez-2015].
- [50] «OMNeT++ Discrete Event Simulator - Home». [Em linha]. Disponível em: <https://omnetpp.org/>. [Acedido: 06-Dez-2015].
- [51] «J-Sim Official». [Em linha]. Disponível em: <https://sites.google.com/site/jsimofficial/>. [Acedido: 06-Dez-2015].
- [52] «atemu - Sensor Network Emulator / Simulator / Debugger». [Em linha]. Disponível em: <http://www.hynet.umd.edu/research/atemu/>. [Acedido: 08-Dez-2015].
- [53] «SENSE-3.0: Sensor Network Simulator and Emulator». [Em linha]. Disponível em: <http://www.ita.cs.rpi.edu/>. [Acedido: 08-Dez-2015].
- [54] «TOSSIM - TinyOS Wiki». [Em linha]. Disponível em: <http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/TOSSIM>. [Acedido: 09-Dez-2015].
- [55] E. Egea-Lopez, J. Vales-Alonso, A. S. Martinez-Sala, P. Pavon-Marino, e J. García-Haro, «Simulation tools for wireless sensor networks», em *Proceedings of the International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS05)*, 2005, p. 24.