

Bruno Monteiro Pires

**Seleção dinâmica de interface em redes
IEEE 802.15.4**

Rio Claro

2017

Bruno Monteiro Pires

Seleção dinâmica de interface em redes IEEE 802.15.4

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – Área de Concentração em Arquitetura de Computadores e Sistemas Distribuídos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Universidade Estadual Paulista – UNESP

Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: Alexandro José Baldassin

Coorientador: Alex Roschildt Pinto

Rio Claro

2017

Bruno Monteiro Pires

Seleção dinâmica de interface em redes

IEEE 802.15.4/ Bruno Monteiro Pires. – Rio Claro, 2017-

65 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Alexandro José Baldassin

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista – UNESP

Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 2017.

1. IEEE802.15.4. I. Alexandro José Baldassin. II. Universidade Estadual Paulista. III. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. IV. Seleção dinâmica de interface em redes IEEE 802.15.4

Bruno Monteiro Pires

Seleção dinâmica de interface em redes IEEE 802.15.4

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – Área de Concentração em Arquitetura de Computadores e Sistemas Distribuídos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Trabalho aprovado. Rio Claro, 03 de março de 2017:

Alexandro José Baldassin
Orientador

Profa. Dra. Juliana Freitag Borin
Membro Externo

Prof. Dr. Ivan Rizzo Guilherme
Membro Interno

Rio Claro
2017

Resumo

Redes de sensores sem fios possibilitam o monitoramento dos mais diversos fenômenos e processos, além de abrir caminho para a criação de uma nova geração de dispositivos inteligentes, dinâmicos e interconectados. A diversidade das aplicações as quais se destinam estes sistemas, no entanto, impõe uma série de restrições de projeto, o que favorece iniciativas de desenvolvimento orientadas à aplicação. Embora esta abordagem leve à criação de soluções eficazes para aplicações específicas, estabelece um padrão de desenvolvimento restrito e desconsidera possibilidades de otimização mais abrangentes. Atualmente existem iniciativas de padronização bastante ativas para esta categoria de sistemas, como é o caso do IEEE 802.15.4, no entanto ainda restam questões não resolvidas, comuns à maioria das redes de sensores sem fios, como é o caso da instabilidade inerente aos links de rádio de baixa potência. Este trabalho tem como objetivo utilizar mecanismos disponibilizados por padrões bem estabelecidos como o IEEE 802.15.4 para mitigar os problemas de instabilidade relacionados aos links de comunicação nas redes de sensores sem fios, criando uma plataforma de desenvolvimento robusta e versátil, alinhada com os esforços de padronização que se encontram em andamento. Este trabalho apresenta uma proposta para a arquitetura de nodos de sensores sem fios, a qual busca complementar o modelo genérico comumente utilizado, através da adição de suporte à diversidade de interfaces. Também é introduzida uma proposta de extensão para a camada MAC do padrão IEEE 802.15.4, capaz de abstrair as particularidades relacionadas à transmissão de dados em nodos dotados de múltiplas interfaces de comunicação. A fim de validar as propostas realizadas, são descritos e executados experimentos utilizando protótipos reais, construídos com base na arquitetura sugerida anteriormente. Os resultados obtidos demonstram que a grande variedade de interfaces disponibilizada pelo IEEE 802.15.4 é suficiente para implementação de sistemas de comunicação robustos, baseados na técnica de diversidade de interfaces. Também conclui-se que as camadas inferiores da pilha de protocolos são capazes de fornecer informações suficientes para que se possa prever com precisão razoável a qualidade dos links de comunicação. Por fim constata-se, que através da utilização de algoritmos de estimativa de qualidade dos links, em conjunto com técnicas de diversidade de interfaces, pode-se obter links de comunicação mais robustos, com baixo *overhead* energético.

Palavras-chave: IEEE 802.15.4. diversidade de interfaces. MAC. estimativa de qualidade do link.

Abstract

Wireless Sensor Networks enable the monitoring of various process and phenomena, also leading the way to the creation of a new generation of smart, dynamic and interconnected devices. The great diversity of applications to which these systems are intended for, however, put several constraints on its projects, motivating the use of application oriented solutions. Although this approach might lead to effective solutions for targeted applications, it also ignores wider optimization possibilities. Currently there are some very active ongoing standardization efforts related to low-power wireless sensor networks, like the IEEE 802.15.4 standard, however there are still unresolved issues, common to the vast majority of these systems like, for example, the inherent unstability of low power wireless communication links. This paper's main goal is to provide solutions to mitigate link stability issues related to most of the common wireless sensor network's radio communication systems. By utilizing mechanisms provided by well established standards, like IEEE 802.15.4, a robust and flexible development platform, aligned with the ongoing standardization processes, will be created. This paper proposes a wireless sensor node architecture that intends to complement most common generic models by adding suport to interface diversity. It also proposes an amendment to IEEE 802.15.4 MAC layer, by adding the capabilities needed to handle interface diversity specifics. In order to validate the previously made proposals, prototypes based on the suggested architecture were built and real-life experiments were conducted. The results indicate firstly that the great number of interfaces supported by IEEE 802.15.4 is enough to allow for the use of frequency based interface diversity technics. It is also possible to conclude that the lower layers of the protocol stack are able to provide enough information to predict link quality with reasonable accuracy. Finally we conclude that through the use link quality estimation algorithms in conjunction with interface diversity techniques it is possible to attain more robust communication links, without incurring in great power consumption overhead.

Keywords: IEEE 802.15.4. interface diversity. MAC. link quality estimation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Nodo de sensores sem fio: arquitetura básica	12
Figura 2 – Técnicas para conservação de energia	15
Figura 3 – Processo de estimativa de qualidade do link.	20
Figura 4 – Métodos para estimativa de qualidade dos links.	24
Figura 5 – Arquitetura da plataforma PhyNode.	38
Figura 6 – Protótipos do módulo PhyNode	44
Figura 7 – Algoritmo de seleção PhyMAC - <i>Triangle</i>	47
Figura 8 – Algoritmo de seleção PhyMAC - Processo de sincronização	48
Figura 9 – Algoritmo de seleção PhyMAC - Transmissor	49
Figura 10 – PRR (Transmissão através de todas as interfaces)	52
Figura 11 – Distribuição da recepção dos pacotes (Sem otimização)	53
Figura 12 – PRR (Triangle)	55
Figura 13 – Distribuição da recepção dos pacotes (Triangle)	56
Figura 14 – Métrica <i>Triangle</i>	57
Figura 15 – Métrica <i>Triangle</i> - Fatores de calibração	58

Lista de tabelas

Tabela 1 – Camadas do modelo OSI	31
Tabela 2 – Definições PHY do IEEE 802.15.4 Rev.2003, Rev.2006 e Rev.2011 . . .	34
Tabela 3 – Definições PHY do IEEE 802.15.4-2015	36
Tabela 3 – Definições PHY do IEEE 802.15.4-2015 (continuação)	37
Tabela 4 – Comparativo de radiotransmissores	43
Tabela 5 – PhyMAC IEEE 802.15.4 <i>Information Element</i>	48

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos e Contribuições	10
1.2	Organização do texto	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Conservação de energia	14
2.1.1	Técnicas baseadas em <i>duty-cycling</i>	15
2.1.2	Técnicas orientadas a dados	16
2.1.3	Técnicas orientadas à mobilidade	16
2.2	Estimativa de qualidade dos links	17
2.2.1	Etapas do processo de estimativa	19
2.2.2	Requisitos para estimativa de qualidade dos links	21
2.2.3	Mecanismos básicos para LQE	23
2.2.3.1	Mecanismos baseados em hardware	24
2.2.3.2	Mecanismos baseados em software	26
3	DIVERSIDADE DE INTERFACES	27
4	O PADRÃO IEEE 802.15.4	31
5	PHYNODE	38
5.1	Sistema de processamento	39
5.2	Sistemas de alimentação	39
5.3	Sistema de comunicação	41
6	PHYMAC	45
7	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL	51
7.1	PhyNode	52
7.2	PhyMAC	54
8	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61

1 Introdução

Redes de sensores sem fios têm, desde seu surgimento, possibilitado o monitoramento dos mais diversos fenômenos e processos, além de abrir caminho para a criação de uma nova geração de sistemas inteligentes, dinâmicos e conectados. Historicamente, esforços visionários, como Igloo White ([WARNEKE et al., 2001](#)) e Smart Dust ([CORREL, 2004](#)), demonstraram o potencial desta tecnologia. No entanto, até o momento, são raras as iniciativas realizadas no sentido de idealizar plataformas de uso geral.

A diversidade das aplicações as quais se destinam as redes de sensores sem fios impõe restrições no projeto e na implantação destes sistemas, o que favorece iniciativas de desenvolvimento orientadas à aplicação. Embora esta abordagem leve à criação de soluções eficazes para aplicações específicas, estabelece um padrão de desenvolvimento restrito e desconsidera possibilidades de otimização mais abrangentes, além de inibir eventuais reduções de custo resultantes da produção em massa e difusão da tecnologia ([RAWAT et al., 2014](#)).

É possível supor que dentre as motivações para adoção generalizada deste modelo de desenvolvimento esteja o fato de as pesquisas na área terem se iniciado antes que as tecnologias que as viabilizam estivessem totalmente desenvolvidas. Tal consideração fica evidente quando se observa, por exemplo, a história de Igloo White: uma operação militar responsável por monitorar os campos de batalha durante a guerra do Vietnã, através do que talvez tenha sido a primeira utilização documentada de uma rede de sensores sem fios. Na época foi necessário que cada um de seus componentes fosse projetado sob medida, assim como a infraestrutura necessária para coleta e posterior processamento dos dados obtidos. Isso fez com que a operação demandasse uma quantidade exorbitante de recursos, sendo sua execução assegurada somente após substanciais investimentos do departamento de defesa dos Estados Unidos ([WARNEKE et al., 2001](#)).

Efetivamente, diversas das motivações para que se desenvolvessem redes de sensores sem fios e sistemas de informação similares já existiam muito antes que as tecnologias disponíveis possibilitassem a implementação de soluções viáveis. Por este motivo a área sempre foi muito beneficiada pelos avanços realizados no campo da microeletrônica de baixa potência, que vêm acontecendo de forma regular. Isso faz com que frequentemente barreiras técnicas sejam superadas, alterando paradigmas de projeto e abrindo caminho para exploração de novos mercados e aplicações. Razão pela qual o tema continua recebendo tanta atenção, apesar de as pesquisas na área terem começado a se intensificar há mais de uma década, no início dos anos 2000 ([KAHN; KATZ; PISTER, 2000](#); [POTTIE; KAISER, 2000](#); [HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000](#)).

Contudo, o maior motivador para o crescente interesse no desenvolvimento de redes de sensores sem fios foi, sem dúvida, o surgimento do conceito de IoT (*Internet of Things*), ou Internet das Coisas: um paradigma tecnológico no qual se propõe incorporar, aos mais diversos objetos, tecnologias que permitam que eles se comuniquem, diretamente (entre si) ou através da Internet, e que possam ser acessados remotamente a fim de prover informações úteis, ou ainda de permitir que atuem e interajam ativamente com o ambiente ao seu redor. Segundo (HARROP; DAS, 2014), os mercados relacionados às redes de sensores sem fios devem chegar, até o ano de 2024, a movimentar cerca de 1.8 bilhões de dólares anualmente, sendo esta soma referente somente aos sistemas de rede com topologia *mesh*. Estima-se também um crescimento exponencial na quantidade de dispositivos conectados, podendo esta atingir um total de 25 bilhões de dispositivos até 2020 (WANT; DUSTDAR, 2015). Para que esta demanda possa ser atendida, no entanto, ainda existem diversos desafios a serem superados. Se destacam questões como padronização dos protocolos de comunicação e interoperabilidade (RAWAT et al., 2014; International Electrotechnical Commission, 2014), dentre outros tópicos vinculados à massificação desta tecnologia.

Neste âmbito, a obtenção de links de comunicação versáteis e confiáveis é essencial, sendo que o método mais disseminado atualmente é a transmissão de dados via radio-frequência. Se comparada a outras técnicas, a utilização de radiotransmissores oferece melhor escalabilidade e maior flexibilidade quanto à topologia das redes, além de simplificar o processo de implantação, ao permitir que se integrem novos sistemas à infraestrutura já existente sem que sejam necessárias grandes intervenções como, por exemplo, a adição de cabeamento.

No entanto a qualidade dos links de rádio sofre influência de diversas variáveis externas, como por exemplo: interferência gerada por outros equipamentos, alterações na vegetação, objetos se movendo nas proximidades e até mesmo mudanças nas condições climáticas. Logo, a eficiência destes links tende a variar ao longo do tempo e de acordo com a localização dos transmissores e receptores (KUSY et al., 2011). Protocolos de roteamento modernos são capazes de lidar com estas adversidades detectando alterações na qualidade dos links individuais e estabelecendo rotas alternativas a fim de otimizar o fluxo de dados na rede e garantir maior eficiência energética (GNAWALI et al., 2009). No entanto, esta abordagem depende do provisionamento de rotas alternativas, requerendo que sejam implantadas redes mais densas do que seria estritamente necessário para que cumprissem sua função, o que eleva os custos e pode dificultar o processo de implantação.

1.1 Objetivos e Contribuições

Este trabalho tem como objetivo explorar alternativas para mitigar os problemas de instabilidade relacionados aos enlaces de rádio de baixa potência frequentemente utilizados

para implementação de redes de sensores sem fios. Diversas iniciativas já foram realizadas com este intuito, contudo se trata de um espaço de soluções bastante amplo e diversificado, havendo ainda grande potencial para otimização. A abordagem proposta nos capítulos seguintes buscará utilizar mais intensivamente o hardware e as camadas inferiores dos protocolos de comunicação, a fim de permitir a implementação de soluções mais flexíveis e robustas, capazes de operar em uma maior gama de situações.

Mais especificamente, a solução proposta será dividida em dois segmentos principais: a complementação da arquitetura básica do hardware dos nodos de sensores sem fios, com o objetivo de conferir maior robustez e flexibilidade às interfaces de comunicação através da utilização da técnica de diversidade de interfaces; e uma proposta de extensão para camada MAC do padrão IEEE 802.15.4, capaz de abstrair as particularidades relacionadas à transmissão de dados em nodos dotados de múltiplas interfaces.

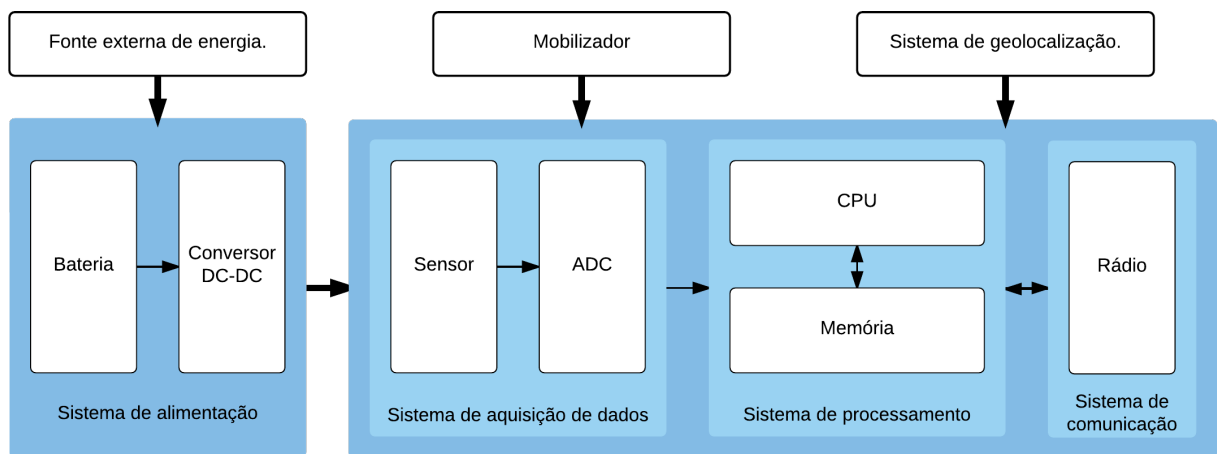
1.2 Organização do texto

Este trabalho está organizado da seguinte forma: inicialmente, no Capítulo 2, serão apresentados os elementos teóricos básicos necessários para situar o leitor a respeito dos conceitos utilizados mais adiante, assim como permitir que se compreendam as motivações para realização deste trabalho. No Capítulo 3 será apresentado detalhadamente o conceito de diversidade de interfaces, além de uma breve análise de outros trabalhos relacionados. O capítulo seguinte, 4, será dedicado à apresentação do padrão IEEE 802.15.4, no qual serão baseadas as soluções apresentadas nos capítulos seguintes. No Capítulo 5 será introduzida a arquitetura PhyNode, proposta para extensão do modelo genérico de nodos de sensores sem fios. Neste mesmo capítulo serão descritos os protótipos confeccionados para avaliação experimental das propostas realizadas por PhyNode e PhyMAC. No Capítulo 6 serão apresentadas propostas de extensão à camada MAC do padrão IEEE 802.15.4, com o objetivo de prover suporte para a diversidade de interfaces, como implementada em PhyNode (5). Então, no Capítulo 7, serão apresentados os procedimentos de teste e resultados obtidos nos experimentos realizados com a plataforma PhyNode. Por fim, no Capítulo 8 serão apresentadas as conclusões que puderam ser obtidas através do desenvolvimento do presente trabalho.

2 Fundamentação teórica

A fim de embasar as discussões apresentadas ao longo deste trabalho, este capítulo será dedicado a apresentar os diversos conceitos que serão futuramente utilizados, começando pela própria arquitetura associada às redes de sensores sem fios. Estes sistemas são definidos como redes compostas por um conjunto de nodos de sensores (também conhecidos como *motes*), capazes de estabelecer uma infraestrutura de comunicação de forma *ad-hoc*, e utiliza-la para coletar e transmitir dados obtidos a partir dos sensores presentes em cada nodo. Podem contar ainda com um ou mais *sinks*, responsáveis por concentrar a coleta dos dados obtidos, além de *gateways*, responsáveis por fazer a ponte entre os nodos que compõem a rede e o exterior, disponibilizando os dados coletados a uma rede local ou transmitindo-os diretamente para a internet. A arquitetura ilustrada na [Figura 1](#) será considerada daqui em diante como o modelo básico de um nodo de sensores sem fio.

Figura 1 – Nodo de sensores sem fio: arquitetura básica



Adaptado de [Anastasi et al. \(2009\)](#)

Cada nodo de sensor representado por esta arquitetura é composto essencialmente por quatro subsistemas ([AKYILDIZ et al., 2002](#); [RAWAT et al., 2014](#)).

- *Sistema de alimentação.* Responsável pelo fornecimento de energia aos demais componentes, devendo regular a voltagem e realizar outras adequações que se façam necessárias nas linhas de alimentação do nodo. Pode ainda realizar a captura e o armazenamento da energia proveniente de fontes secundárias (externas), quando disponíveis. É essencialmente composto por uma ou mais baterias primárias e um conversor DC-DC, capaz de manter, de forma eficiente, os níveis de voltagem adequados nas linhas de alimentação;

- *Sistema de aquisição de dados.* É capaz de obter dados amostrais a partir dos fenômenos monitorados, quando solicitado. Deve contar com um ou mais transdutores, responsáveis por converter as grandezas físicas monitoradas em sinais elétricos analógicos, além de circuitos de conversão analógico-digital (ADC's), cujo propósito é realizar a conversão dos sinais analógicos, provenientes dos transdutores, para sinais digitais compatíveis com as interfaces do sistema de processamento;
- *Sistema de processamento.* É responsável por coordenar as tarefas delegadas ao nodo como, por exemplo, a obtenção de dados amostrais ou o roteamento de pacotes de dados encaminhados por outros nodos. Este sistema é composto essencialmente por um microcontrolador com memória integrada, podendo opcionalmente contar com módulos de memória adicionais, a fim de permitir o armazenamento de maiores quantidades de dados (o que pode vir a ser necessário de acordo com a topologia da rede ou caso não haja disponibilidade de conexões com o exterior);
- *Sistema de comunicação.* É o responsável por permitir que os dados trafeguem entre os nodos que compõem a rede. Sua implementação mais comum, e a que será considerada ao longo deste trabalho, se baseia na utilização de radiotransmissores de baixa potência. No entanto vale ressaltar que as possibilidades de implementação não se restringem somente a este método. Em casos específicos, e onde a transmissão via radiofrequência não é vantajosa, factível ou financeiramente viável, outros métodos de comunicação (como infra-vermelho ou transmissores acústicos) podem ser utilizados.

Algumas aplicações podem ainda requerer sistemas adicionais, como por exemplo: mecanismos de geolocalização (capazes de determinar a localização geográfica de determinado nodo), sistemas de mobilização (capazes de mover os nodos equipados entre diferentes posições ou de reorientar antenas direcionais de alto ganho), sistemas de localização relativa (capazes de determinar a posição de um nodo em relação aos demais) entre outros. A implementação destes sistemas pode tanto requerer hardware adicional ou permitir que sejam implementados puramente em software, no entanto, por se tratarem de componentes raramente utilizados, não serão considerados parte integrante deste modelo básico.

Existem ainda os *gateways* e *sinks*, cuja arquitetura básica se assemelha à presente nos demais nodos. *Gateways*, no entanto, são responsáveis por estabelecer a conexão entre a rede de sensores e alguma rede externa (ou diretamente com a internet), portanto devem contar adicionalmente com interfaces de comunicação secundárias. Já os *sinks* são responsáveis por concentrar o recebimento dos dados coletados pela rede e, portanto, devem ser capazes de armazenar maior quantidade de dados localmente. Ambos frequentemente possuem maior poder de processamento, a fim de permitir que lidem com a carga extra de trabalho sem criar gargalos. Geralmente as funções de *sink* e *gateway* são atribuídas aos mesmos nodos, facilitando a coleta ou transferência dos dados coletados.

Para melhor compreender os desafios com os quais as propostas realizadas nas seções PhyNode (5) e DivMac (6) visam lidar, certos aspectos específicos da operação dos nodos devem ser esclarecidos. A seguir serão melhor discutidas algumas peculiaridades e métodos relacionados à conservação de energia e estimativa de qualidade dos links de rádio nas redes de sensores sem fios.

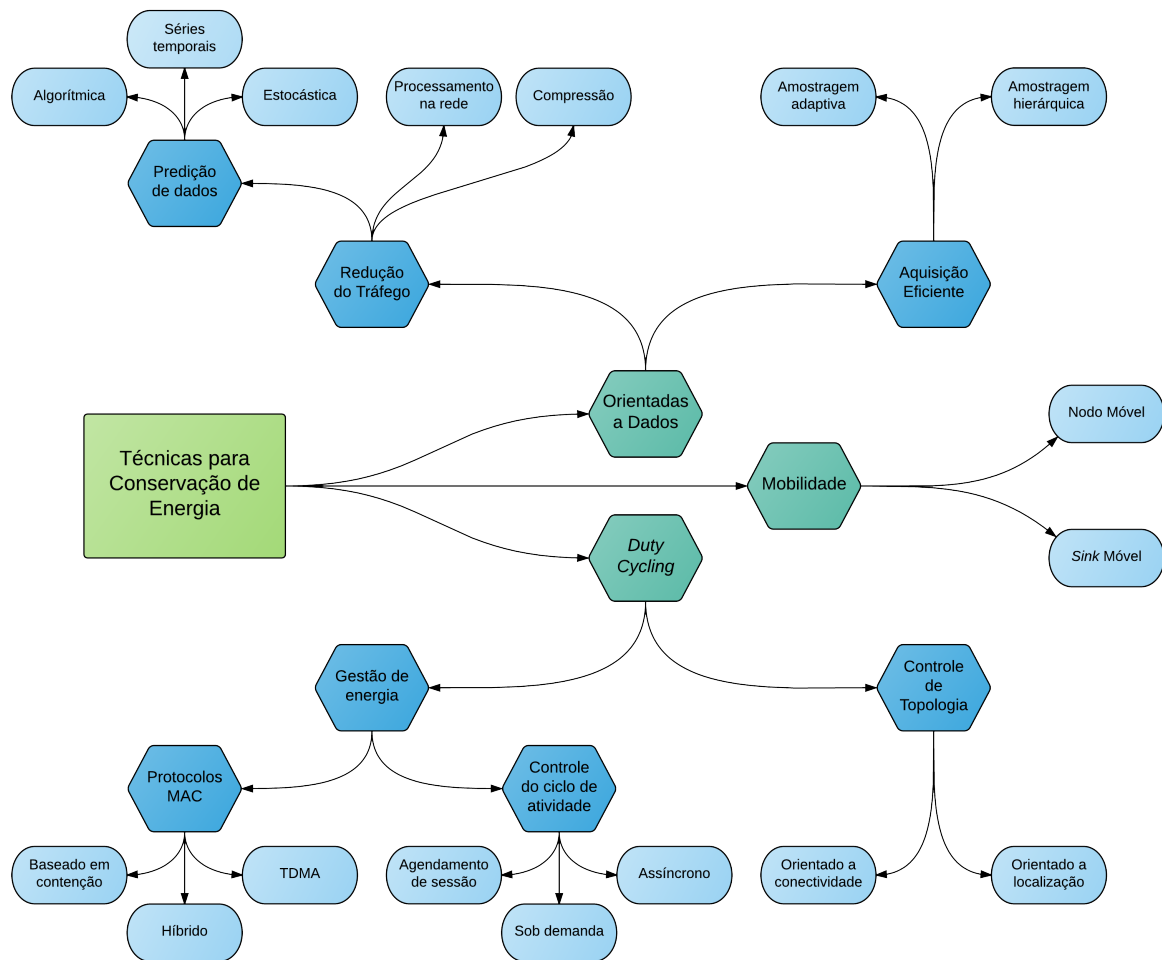
2.1 Conservação de energia

A distribuição do consumo energético dentre os diferentes subsistemas, bem como as rotinas empregadas para transmissão e aquisição de dados, estão parcialmente sujeitas aos requisitos específicos das aplicações. No entanto algumas observações gerais são aplicáveis à maioria dos sistemas:

- O consumo apresentado pelos sistemas de comunicação é muito superior ao originado no sistema de processamento, sendo a energia utilizada para transmitir um único bit via rádio equivalente à empregada no processamento de até mil instruções, num nodo típico (POTTIE; KAISER, 2000). Sendo assim, é mais vantajoso aplicar processamento local, a fim de reduzir o volume de dados a ser transmitido, do que transmitir grandes quantidades de dados brutos;
- O consumo energético apresentado pelos transmissores de rádio nos modos de recepção, transmissão e espera é da mesma ordem. Existem, no entanto, em grande parte dos transmissores mais recentes, modos de baixo consumo cuja utilização, apesar de geralmente resultar em certa latência adicional, deve ser priorizada sempre que os protocolos de rede permitirem, uma vez que resultam em expressivas reduções do consumo de energia no estado de espera;
- O consumo do sistema de aquisição de dados é altamente dependente dos requisitos da aplicação, sendo em muitos casos significativo, e até mesmo superior ao consumo do sistema de comunicação. Nestes casos, torna-se interessante utilizar algoritmos destinados especificamente a minimizar o consumo referente à coleta de dados.

Baseando-se nestas premissas é possível explorar diversas abordagens para otimizar o consumo de energia nos nodos de sensor. A Figura 2 apresenta uma classificação hierárquica destas técnicas, como proposta em (ANASTASI et al., 2009). Embora mais de uma dezena de técnicas específicas sejam apresentadas, conceitualmente estas abordagens podem ser todas classificadas em três subcategorias principais: técnicas baseadas em *duty-cycling*, técnicas orientadas a dados e técnicas orientadas a mobilidade.

Figura 2 – Técnicas para conservação de energia



Adaptado de Anastasi et al. (2009)

2.1.1 Técnicas baseadas em *duty-cycling*

Técnicas baseadas em *duty-cycling* consistem em estabelecer estratégias para que determinados sistemas dos nodos possam, periodicamente, ser desativados ou colocados em estados de baixo consumo, possibilitando desta maneira que haja uma redução na média de consumo energético do sistema em questão. O período de atividade, ou *duty-cycle*, é um valor percentual que representa a fração de tempo durante a qual este subsistema deverá manter-se ativo dentro de um determinado período de tempo.

Embora também possam ser aplicadas aos demais sistemas, técnicas desta natureza são comumente utilizadas para o controle do sistema de comunicação, dado que neste caso podem proporcionar melhorias significativas devido ao alto consumo deste sistema. Contudo o aumento na latência dos links de comunicação, ocasionado pela indisponibilidade dos transceptores durante os períodos em que são colocados em modos de baixo consumo,

faz com que esta abordagem não seja adequada em todas as situações. Convenientemente em alguns casos é possível variar o *duty-cycle* dinamicamente, de acordo com a intensidade do tráfego, por exemplo, a fim de proporcionar um melhor comprometimento entre a redução do consumo de energia e a latência dos links de comunicação.

2.1.2 Técnicas orientadas a dados

Apesar de as técnicas baseadas em *duty-cycling* possibilitarem alguma redução no consumo de energia ao impedir que certos sistemas do nodo permaneçam em modos de alto consumo durante períodos de inatividade, por definição elas não dispõem dos meios para análise dos dados coletados pelo sensores ou retransmitidos pelos nodos. Assim sendo, ignoram quaisquer redundâncias presentes nas informações que circulam pela rede, potencialmente permitindo que certa quantidade de energia seja desperdiçada durante a manipulação de dados essencialmente desnecessários. Já as técnicas orientadas a dados são especificamente destinadas a analisar estes dados, de forma a eliminar possíveis redundâncias e evitar ciclos de amostragem ou retransmissões desnecessárias. Estas técnicas operam na camada de aplicação, sendo geralmente utilizadas em conjunto com outros métodos, operando em camadas inferiores, a fim de reduzir ainda mais o consumo energético das redes de sensores.

Mais especificamente, a ausência de métodos destinados ao controle de redundâncias afeta a eficiência energética da rede permitindo que dois tipos distintos de evento ocorram:

- *Transmissão de dados redundantes.* Dados amostrais geralmente apresentam forte correlação espacial e temporal logo, para satisfazer os requisitos de determinadas aplicações, pode não ser necessário transmitir na íntegra todas as amostras coletadas. É possível ainda aplicar técnicas de agregação e compressão de dados a fim de reduzir o volume de tráfego sem omitir amostras já coletadas;
- *Aquisição de dados redundantes.* Alguns sistemas de aquisição apresentam alto consumo de energia. Nestes casos o ideal é evitar, sempre que possível, que sejam realizados ciclos de amostragem desnecessários. Para tal geralmente são empregados algoritmos especializados, responsáveis por verificar se dados equivalentes foram previamente coletados (localmente ou por nodos próximos) antes que se iniciem novas amostragens.

2.1.3 Técnicas orientadas à mobilidade

Existem ainda técnicas de conservação de energia baseadas na mobilidade de nodos. Durante sua operação de rotina, os nodos de uma rede de sensores sem fios conduzem os dados coletados em direção aos *sinks*. A principal consequência deste paradigma é a

sobrecarga dos meios de transmissão dos nodos localizados próximo aos *sinks*, através dos quais deverão trafegar na íntegra todos os dados coletados pela rede (LI; MOHAPATRA, 2007). A sobrecarga dos meios de transmissão nesta região provoca um consumo acelerado das reservas de energia dos nodos envolvidos: em geral os protocolos de comunicação se tornam menos eficientes em regiões sobrecarregadas, devido a maior probabilidade de ocorrerem colisões e, conseqüentemente, um maior número de tentativas de retransmissão. A exaustão prematura das fontes de energia destes nodos, por sua vez, pode levar à subutilização de nodos mais distantes que, apesar de não terem suas reservas energéticas esgotadas, são inutilizados caso deixem de dispor de rotas de acesso aos *sinks*.

Neste contexto, nodos ou *sinks* móveis podem ser utilizados a fim de mitigar a sobrecarga de certas regiões, realizando a coleta dos dados enquanto se movimentam através da rede. Esta abordagem exige que os nodos estáticos fiquem à espera da passagem dos nodos móveis, quando terão a oportunidade de transmitir os dados diretamente a um *sink* móvel, ou através de rotas mais eficientes. Este processo beneficia o balanceamento de cargas e possibilita uma utilização mais uniforme das reservas de energia de todos os nodos estáticos. Ao eliminar regiões potencialmente sobrecarregadas é possível ainda obter algum aumento na eficiência dos protocolos de comunicação, devido à redução dos níveis de contenção (tentativas frustradas de acesso aos meios de transmissão). Para que estas abordagens sejam efetivas, no entanto, deve-se planejar cuidadosamente os padrões de movimentação dos nodos móveis. Caso se torne muito complexo ou dispendioso projetar nodos móveis customizados, existe ainda a possibilidade de utilizar-se de entidades que já se movimentem pela área monitorada, como veículos ou animais.

2.2 Estimativa de qualidade dos links

A propagação dos sinais de rádio, principalmente nos links de baixa potência como os utilizados nas redes de sensores sem fios, é significativamente afetada por diversos fatores externos que contribuem para sua degradação. Isso faz com que estes links se comportem de forma errática, sendo que sua performance pode variar ao longo do tempo, e de acordo com a localização dos nodos. Falhas de transmissão, como o corrompimento ou perda dos pacotes de dados e as ações subsequentes, destinadas à correção destas falhas, chegam a ser responsáveis por 50% a 80% do consumo de energia proveniente dos sistemas de comunicação, variando de acordo com a intensidade do tráfego (SRINIVASAN et al., 2006). Adicionalmente, a queda de performance causada por estas falhas prejudica a execução de protocolos de mais alto nível, uma vez que a largura de banda disponível é efetivamente reduzida e inviabiliza-se a execução de transações que imponham restrições temporais rigorosas.

As perturbações responsáveis por degradar a qualidade dos links são causadas por

fenômenos cujo comportamento e origens são bastante distintos. No entanto podem ser classificadas quanto à sua natureza em duas principais categorias: atenuação e interferência. Entende-se por atenuação a absorção ou reflexão parcial dos sinais de rádio emitidos por um transmissor, em decorrência de sua interação com o ambiente, resultando numa redução da intensidade do sinal captado pelo receptor. Já o termo interferência se refere ao acoplamento de sinais externos, e de frequência similar, às transmissões realizadas entre um transmissor e um receptor. Este processo causa distorções no sinal original e resulta no corrompimento dos dados transmitidos sem que haja necessariamente qualquer redução na intensidade do sinal captado pelo receptor. De acordo com [Baccour et al. \(2012\)](#) são três os principais fatores que exercem influência sobre a qualidade dos links de rádio:

- *O ambiente.* Além de ser o principal componente para a atenuação dos sinais, também é responsável pela ocorrência do fenômeno conhecido como propagação multicaminho. Este fenômeno dá origem a uma categoria particular de interferência, que ocorre quando componentes parciais de um mesmo sinal, ao se propagarem através de certo ambiente, são refletidos e dispersam-se através de múltiplas rotas, cada um destes componentes atingindo o receptor com diferente intensidade e defasagem temporal ([KUSY et al., 2011](#)), como resultado há distorção do sinal original, levando ao corrompimento dos dados. O ambiente também determina os níveis de ruído de fundo, contribuindo para determinação da relação entre sinal e ruído.
- *O hardware.* Transmissores de rádio invariavelmente apresenta alguma variabilidade nos níveis de sinal, devido a seu próprio ruído interno e às faixas de tolerância aplicadas aos valores dos componentes utilizados para sua construção ([GOLDSMITH, 2005](#)). Com o desenvolvimento de hardware mais atualizado, este fator tende a exercer menor influência sobre a qualidade final dos links, porém não deve ser desconsiderado durante a concepção de métodos de estimativa de qualidade ou protocolos de comunicação.
- *Interferência.* É causada pela presença de múltiplos sinais sendo transmitidos concorrentemente, num mesmo ambiente, através de faixas de frequência similares. É possível inclusive que estes sinais originem-se em diferentes nodos de uma mesma rede de sensores sem fios. Segundo [Baccour et al. \(2012\)](#), a área sobre a qual transmissões de um nodo podem causar interferência destrutiva supera a área na qual este nodo consegue manter links de comunicação confiáveis, logo podem-se estabelecer relações de interferência mesmo entre nodos que não sejam vizinhos diretos. Fontes de interferência podem ainda incluir outros equipamentos que compartilhem as mesmas faixas de frequência para comunicação sem fios ou mesmo ruído eletromagnético gerado involuntariamente por certos equipamentos elétricos.

Nas redes de sensores sem fios, ao contrário do que acontece em outros ambientes, as aplicações finais não podem desacoplar completamente suas atividades dos processos de comunicação. Estas aplicações e os protocolos de rede por elas empregados devem, a fim de otimizar seus processos, levar em consideração a qualidade dos links disponíveis. Estimativas de qualidade acuradas podem auxiliar no processo de seleção de rotas mais eficientes, caso existam (YanJun Li et al., 2005), ou ainda serem utilizadas para determinar os momentos mais apropriados para transmissão de dados, nos quais haverá maior probabilidade de sucesso (SRINIVASAN et al., 2008). Alternativamente, quando disponibilizadas a processos de mais alto nível, estas estimativas podem também ser utilizadas para adequar certas rotinas à qualidade momentânea dos links permitindo, por exemplo, alterações dinâmicas nas frequências de aquisição de dados, ou no comportamento de mecanismos de compressão ou agregação de dados, que podem se adequar à banda disponível.

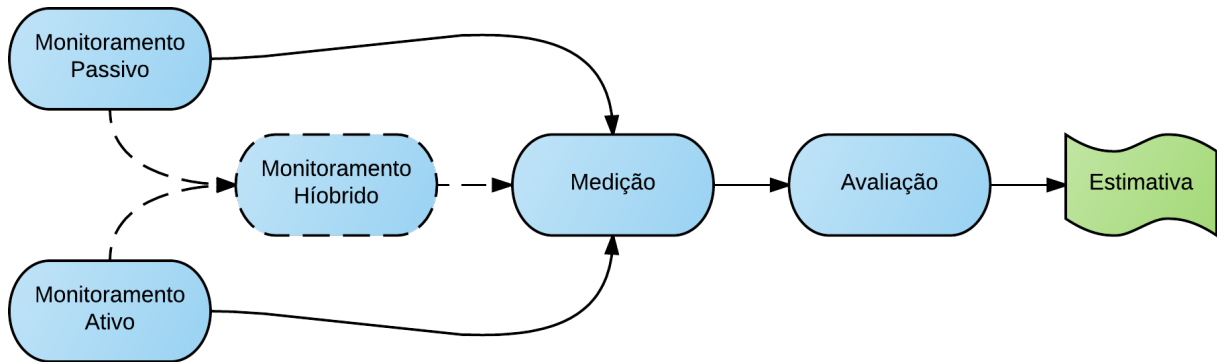
2.2.1 Etapas do processo de estimativa

Entende-se por estimativa da qualidade de um link como a avaliação de uma métrica, definida matematicamente a partir de parâmetros relevantes, e aplicada sobre um conjunto de dados amostrais, o qual pode ser composto por uma quantidade predefinida de amostras, ou por uma quantidade variável de amostras coletadas durante um período predefinido de tempo. Geralmente refere-se a esta métrica como LQE (*Link Quality Estimator*). Para que seja possível realizar a estimativa é necessário que sejam realizadas medições no link, por exemplo, através do registro dos números de sequência dos pacotes recebidos ou da aferição da intensidade do sinal durante a recepção dos pacotes de dados. É necessário ainda que se defina um método de monitoramento, responsável por garantir que haverá uma quantidade mínima de tráfego no link, a fim de permitir que as medições possam ser realizadas com frequência regular. O processo completo de estimativa de qualidade consiste, portanto, em três atividades distintas: monitoramento do link, medições no link e avaliação da métrica (BACCOUR et al., 2012). Estas atividades são ilustradas na Figura 3.

A primeira atividade, monitoramento do link, pode ser realizada baseando-se em três diferentes abordagens: monitoramento ativo, passivo ou híbrido. As informações obtidas pelos mecanismos de monitoramento, além de permitirem a coleta de dados para estimativa de qualidade dos links, podem ser consumidas por outros algoritmos relacionados aos processos de roteamento ou controle de topologia.

O monitoramento ativo é realizado através da troca de pacotes de teste, denominados *beacons*, entre os nodos e seus vizinhos. Estes pacotes podem ser transmitidos via *broadcast* (De Couto et al., 2005) ou *unicast* (KIM; SHIN, 2006). Mecanismos baseados em *broadcast* tem a vantagem de não requererem *feedback*, por parte dos destinatários, quanto ao recebimento dos *beacons*, o que permite implementações mais simples, se comparado aos mecanismos baseados em *unicast*, e evita possíveis retransmissões automáticas por parte

Figura 3 – Processo de estimativa de qualidade do link.

Adaptado de [Baccour et al. \(2012\)](#)

da camada de enlace. Já as alternativas baseadas em *unicast* proporcionam a obtenção de dados mais acurados, uma vez que utilizam pacotes semelhantes ao tráfego real ([SANG; ARORA; ZHANG, 2010](#)) e são capazes de identificar possíveis assimetrias nos links. Entretanto mecanismos baseados em *unicast* tendem a consumir uma quantidade maior de recursos do sistema de comunicação.

O monitoramento passivo explora o tráfego usual da rede para computar as estatísticas de conectividade. Com isto reduz-se a utilização de banda e o consumo de energia associados à transmissão dos *beacons*. Caso o tráfego envolvendo um único nodo não seja suficiente para manter suas estimativas atualizadas pode-se utilizar a técnica conhecida como *sniffing*, que consiste em capturar todos os pacotes que trafegam nas proximidades, permitindo a obtenção de um volume maior de informações ([LAI et al., 2003; WOO; CULLER, 2003](#)). É possível ainda capturar somente as confirmações de recebimento emitidas por nodos vizinhos, aproveitando-se de *beacons* emitidos por outros nodos ([Peng Jiang et al., 2006; Yanjun Li et al., 2005](#)). A utilização de técnicas de *sniffing*, no entanto, exige que os módulos de rádio sejam mantidos em modo de escuta por períodos maiores, elevando o consumo energético do sistema de comunicação ([LAI et al., 2003](#)). Adicionalmente, em redes onde o volume de tráfego é reduzido ou desbalanceado, o monitoramento passivo pode criar uma deficiência de medições atualizadas, levando a estimativas imprecisas ([BACCOUR et al., 2012](#)).

Existe ainda a possibilidade de utilizar métodos que combinem as técnicas de monitoramento ativo e passivo, permitindo melhores relações entre consumo de energia e obtenção de estimativas atualizadas ([GNAWALI et al., 2009; KIM; SHIN, 2006](#)). Geralmente estas técnicas, denominadas híbridas, consistem em utilizar o monitoramento passivo durante os períodos em que o volume de tráfego real permitir a obtenção de medições suficientemente atualizadas, alternando para mecanismos de monitoramento ativo quando o tráfego preexistente não for suficiente para manter as estimativas precisas

para todos os nodos.

A segunda atividade relacionada ao processo de estimativa de qualidade consiste em realizar medições a partir dos dados obtidos na etapa anterior. As atividades realizadas nesta etapa envolvem computar parâmetros que não podem ser obtidos diretamente durante o monitoramento dos links, porém podem ser deduzidos a partir dos dados coletados. Parâmetros como, por exemplo, a relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio* ou SNR), taxas de recebimento ou perda de pacotes, podem ser computados nesta fase. É importante notar que os parâmetros monitorados pelos transmissores e receptores, através das atividades de monitoramento, não são os mesmos. Contadores de retransmissão, por exemplo, estão disponíveis somente nos transmissores. Já medições de intensidade do sinal recebido estão presentes somente nos receptores. Portanto técnicas de medição diferentes devem ser aplicadas a cada uma das extremidades do link.

A última etapa deste processo consiste em utilizar os dados provenientes da atividade de medição para avaliação de uma métrica (LQE), através da qual obtém-se a estimativa de qualidade do link. Os LQEs mais básicos podem ser subdivididos em duas categorias: baseados em software ou hardware. LQEs baseados puramente em hardware geram estimativas a partir de parâmetros associados à integridade do sinal, os mais comuns são: SNR, RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e LQI (*Link Quality Indicator*). Já os LQEs baseados puramente em software como, por exemplo, PRR (*Packet Reception Ratio*) ou RNP (*Required Number of Packets*), avaliam parâmetros relacionados à integridade dos pacotes recebidos (BACCOUR et al., 2012).

No entanto a confiabilidade dos estimadores citados acima é bastante limitada, uma vez que consideram somente uma pequena quantidade de parâmetros como base para o cálculo dos resultados. A fim de obter estimativas mais acuradas em geral são utilizados LQEs mais abrangentes, capazes de considerar simultaneamente parâmetros provenientes tanto do hardware quanto do software. *Four-bit*, um LQE proposto em Fonseca et al. (2007), por exemplo, considera parâmetros provenientes das camadas de rede, link e física. Já *Triangle Metric*, proposto em Boano (2010), considera parâmetros provenientes tanto da camada física quanto da camada de controle de acesso ao meio. Há ainda LQEs como *MetricMap*, proposto em Wang, Martonosi e Peh (2007), que utilizam técnicas de aprendizado de máquina, lógica *fuzzy* e outras técnicas avançadas de processamento para aprimorar seus resultados.

2.2.2 Requisitos para estimativa de qualidade dos links

Certos requisitos devem ser satisfeitos para que os estimadores de qualidade dos links possam operar de forma eficiente:

1. *Eficiência energética*. Uma vez que considera-se o consumo de energia como sendo

uma grande preocupação nas redes de sensores sem fios, estimadores de qualidade dos links não devem sobrecarregar os sistemas de processamento e devem requerer o mínimo possível de comunicação adicional. Sistemas ativos com altas taxas de amostragem devem ser, portanto, evitados.

2. *Acurácia.* Entende-se por acurácia como sendo a habilidade de um LQE para caracterizar corretamente o comportamento do link. Sua acurácia determinará a eficiência com que um LQE será capaz de otimizar a utilização dos links pelos protocolos de rede. Na teoria da estimativa define-se que um processo estimado possa ser comparado a um processo conhecido e real, através de técnicas estatísticas, devendo apresentar comportamentos similares. No entanto, tal comparação não é possível para a estimativa de qualidade dos links pois: (i) não há nenhuma métrica amplamente adotada como medida absoluta da qualidade de um link e (ii) a qualidade do link pode ser representada por valores de natureza arbitrária: alguns estimadores baseiam-se no cálculo da taxa de recepção de pacotes, outros na contagem do número de retransmissões necessárias, entre outros.

Contudo a acurácia de um LQE ainda pode ser avaliada indiretamente, isto é, utilizando-se métricas subordinadas aos efeitos da estimativa sobre a eficiência dos protocolos de rede (BACCOUR et al., 2012). Por exemplo, em Fonseca et al. (2007) são avaliados os efeitos da utilização do estimador *Four-bit* sobre a performance do protocolo de coleta de dados CTP (*Collection Tree Protocol*). Conclui-se que a utilização deste estimador promove melhorias na taxa de entrega de pacotes, comprovando que o estimador favorece a seleção consistente de links de melhor qualidade, logo possui boa acurácia. Uma outra abordagem é utilizada em Baccour et al. (2011), onde a distribuição temporal das estimativas fornecidas por alguns estimadores é estatisticamente analisada a fim de determinar sua confiabilidade.

3. *Reatividade.* Considera-se como reatividade, a capacidade de um estimador para detectar e reagir rapidamente a mudanças perenes na rede (Kim M., 2001). Um LQE reativo permite que os protocolos de roteamento e o controle de topologia se adaptem rapidamente a alterações na conectividade dos nodos. O nível de reatividade de um LQE depende de dois fatores: (i) o conjunto de dados utilizados para estimativas e (ii) o método de monitoramento escolhido. Conjuntos de dados pequenos e métodos de monitoramento ativos, utilizando altas taxas de amostragem levam a LQEs reativos. No entanto é importante notar que alguns LQEs são naturalmente mais reativos que outros. LQEs avaliados no emissor demonstraram-se geralmente mais reativos que LQEs avaliados no receptor (BACCOUR et al., 2011).
4. *Estabilidade.* Refere-se a estabilidade como sendo a capacidade de um LQE tolerar transientes na qualidade dos links. É importante que estes transientes sejam filtrados a fim de evitar que protocolos de roteamento e controle de topologia executem,

desnecessariamente, rotinas custosas destinadas a reorganizar a rede após alterações perenes nas rotas disponíveis como, por exemplo, a reinicialização das tabelas de roteamento. Estimadores estáveis podem ser obtidos através do monitoramento do link a longo prazo (LIN et al., 2009). A estabilidade pode ser aferida através do coeficiente de variação das estimativas de qualidade, computado através da razão entre o desvio padrão das estimativas e sua média (WOO; CULLER, 2003), ou ainda avaliando-se o impacto do LQE sobre as rotinas de roteamento. Tipicamente LQEs estáveis resultam em topologias estáveis, nas quais observam-se poucas reorganizações de rotas (BACCOUR et al., 2009).

Para que um estimador opere de forma eficiente, deve adotar a relação apropriada entre estabilidade e reatividade, permitindo que os algoritmos de roteamento adotem a utilização dos links de comunicação que apresentem melhor qualidade a curto e longo prazo. Geralmente estimadores de melhor desempenho combinam múltiplas métricas para obter esta relação (SANG; ARORA; ZHANG, 2010), ou utilizam para tal uma modelagem matemática precisa do comportamento da rede (WOO; CULLER, 2003).

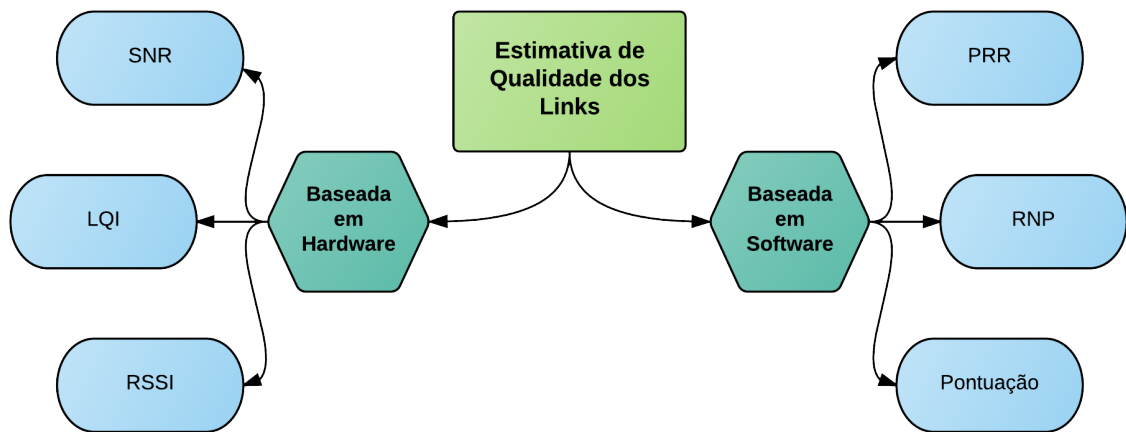
2.2.3 Mecanismos básicos para LQE

A seguir serão apresentados os mecanismos básicos, utilizados para avaliação de diferentes características dos *links* de rádio, através dos quais compõem-se sistemas de estimativa mais complexos. Porém, antes de entrar em detalhes a respeito destes mecanismos, é importante compreender quais são os fenômenos que eles buscam avaliar e como interferem na qualidade da comunicação entre nodos. Em (KUSY et al., 2011) encontram-se destacados os modos de falha mais comuns nos links de baixa potência utilizados em RSSFs.

- Falha, por parte do receptor, ao detectar o preâmbulo de uma transmissão iniciada por outro nodo. Geralmente devido a uma instabilidade temporária no link, o destinatário pode não captar o preâmbulo, elemento responsável por sinalizar o início da transmissão de um pacote. Neste caso o pacote é completamente ignorado por seu destinatário e será, possivelmente, retransmitido.
- Falha, por parte do receptor, ao capturar corretamente os dados de um pacote durante seu recebimento. Geralmente ocorre devido à instabilidade no link durante a transmissão. Neste caso o pacote será recebido, porém irá falhar na verificação de integridade, e será posteriormente descartado. A confirmação de recebimento não será enviada, forçando o emissor a retransmitir o pacote.
- Falha, por parte do transmissor, ao captar a confirmação de recebimento de um pacote previamente enviado. Neste caso o receptor recebe e processa o pacote corretamente,

no entanto alguma instabilidade afeta o link no momento em que a confirmação de recebimento está sendo transmitida. Na ausência de uma confirmação, o transmissor conclui erroneamente que o pacote não foi recebido corretamente. Geralmente são realizadas novas tentativas de transmissão.

Figura 4 – Métodos para estimativa de qualidade dos links.



Adaptado de [Baccour et al. \(2012\)](#)

Embora somente detectar e quantificar a presença de componentes de interferência, atenuação ou distorções causadas pela propagação multi-caminho sobre os sinais subjacentes não seja suficiente para estimar a qualidade de um link com a competência necessária para evitar estes modos de falha, estas informações são a base para avaliação de métricas mais completas. Os mecanismos básicos utilizados para obtê-las podem ser divididos em duas categorias básicas: baseados em *hardware* e baseados em *software*. Encontra-se ilustrada na [Figura 4](#) uma classificação para estes mecanismos. Em geral os mecanismos baseados em hardware são capazes de prover informações acuradas sobre determinadas propriedades físicas dos sinais recebidos, como intensidade do sinal (RSSI) ou relação sinal-ruído (SNR). No entanto não são adequados para avaliar o impacto destes componentes sobre a eficiência do link. Já os mecanismos baseados em software podem prover índices de mais alto nível, como contadores de retransmissão (RNP) ou taxa de recepção de pacotes (PRR). Contudo não são capazes de apontar os fatores de baixo nível responsáveis pelos resultados obtidos.

2.2.3.1 Mecanismos baseados em hardware

Os mecanismos de estimativa baseados em hardware provêm informações a respeito da qualidade dos sinais enquanto processados pelas camadas inferiores da pilha de protocolos. A implementação de tais mecanismos depende de hardware especializado, geralmente

integrado ao *frontend* analógico dos *chips* de rádio. São três os principais mecanismos desta categoria: RSSI, SNR e LQI.

- *Radio Signal Strength Indicator (RSSI)*. O RSSI provê uma medida instantânea da intensidade com que um sinal é recebido pelo módulo de rádio. Quando não há nenhuma transmissão em curso representa uma estimativa da intensidade do ruído de fundo (BACCOUR et al., 2012). A utilização do RSSI é atrativa por consistir numa forma simples e acessível de avaliar a qualidade do link entre dois nodos. No entanto, apesar de existir alta correlação entre baixa intensidade de sinal e falhas de transmissão, a afirmativa complementar pode não ser verdadeira. Mesmo links que possuam RSSI consistentemente elevados podem apresentar altas taxas de falha e perdas de pacotes (SRINIVASAN et al., 2006).
- *Signal to Noise Ratio (SNR)*. Esta métrica representa a intensidade do sinal recebido em relação ao nível de ruído de fundo. Isto a torna uma métrica mais acurada que o RSSI que, por sua vez, indica a intensidade do sinal recebido somada ao ruído de fundo. SNR é, portanto, mais capaz de estimar quais as chances de o sinal recebido ser decodificado corretamente, não importando sua intensidade (SRINIVASAN et al., 2010). No entanto o SNR só pode ser calculado a partir de pacotes detectados com sucesso, o que faz com que não seja confiável quando aplicado aos nodos de regiões transicionais (LAI et al., 2003). Nestas regiões os valores obtidos para o SNR podem ser tendenciosos, superestimando a qualidade do link, uma vez que não contabilizam os pacotes perdidos.
- *Link Quality Indicator (LQI)*. É uma métrica proposta no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE. . . , 2003), porém sua implementação pode variar de acordo com o fabricante e o *chipset* escolhidos. O LQI pode indicar se um link apresenta excelente qualidade ou não. No entanto não é um bom indicador para links intermediários, apresentando alta variância nestas situações (BACCOUR et al., 2012). Aconselha-se utilizar a média dos resultados obtidos durante algum período para melhorar a qualidade das estimativas obtidas (SRINIVASAN et al., 2006). É possível ainda basear-se no LQI para estimar a qualidade do link indiretamente, utilizando sua variância como métrica final (BOANO et al., 2009). Links de baixa qualidade apresentarão alta variância e links de boa qualidade apresentarão baixa variância. Esta técnica permite uma resposta mais rápida que o cálculo da média, pois permite que um resultado final seja obtido sem a necessidade de avaliar uma quantidade tão grande de pacotes. Adicionalmente os valores obtidos a partir deste mecanismo são de natureza arbitrária, podendo variar de acordo com a implementação utilizada por cada fabricante.

Todos estes mecanismos, no entanto, compartilham algumas limitações. Primeiramente, só podem ser computados a partir de pacotes recebidos com sucesso, logo tendem a superestimar a qualidade de links que apresentem muitas perdas de pacotes, uma vez que as estatísticas referentes aos pacotes perdidos são efetivamente ignoradas, fazendo com que os resultados gerados sejam altamente tendenciosos. Adicionalmente, apesar de consistirem em métricas rápidas e de baixo custo, capazes de distinguir corretamente links bons de links ruins, não são capazes de fornecer estimativas mais refinadas (BACCOUR et al., 2012), geralmente não sendo adequados para prover informações relevantes a respeito dos links situados nas regiões transitórias.

2.2.3.2 Mecanismos baseados em software

Os mecanismos baseados em software provêm informações a respeito do link a partir de camadas mais altas da pilha de protocolos. São mais adequados que os mecanismos baseados em hardware para computar estatísticas globais, porém menos capazes de avaliar as condições instantâneas dos meios de transmissão. São três as principais abordagens para desenvolvimento dos mecanismos pertencentes a esta categoria: PRR, RNP, pontuação.

- *Packet Reception Ratio (PRR)*. Representa a razão entre o número de pacotes recebidos com sucesso e o número total de pacotes transmitidos, podendo ser computada a partir dos números de sequência encontrados nos pacotes recebidos. Em alguns casos também é utilizada a métrica análoga e complementar PER (*Packet Error Rate*), obtida a partir de: $PER = 1 - PRR$ (BACCOUR et al., 2012).
- *Required Number of Packets (RNP)*. Esta métrica é obtida através da contagem do número necessário de retransmissões realizadas para que cada pacote enviado seja entregue com sucesso ao destinatário. RNP assume retransmissões automáticas, por parte dos protocolos de roteamento, caso pacotes sejam perdidos (CERPA et al., 2005). Uma abordagem semelhante é utilizada na métrica *Acknowledge Reception Radio (ARR)*, que considera a relação entre o número total de pacotes transmitidos e o número de confirmações de recebimento coletadas (BACCOUR et al., 2012).
- *Métricas baseadas em pontuação*. Existem ainda métricas que apresentam seus resultados através de escalas definidas arbitrariamente, expressas por valores adimensionais, sem que estejam necessariamente relacionados com algum fenômeno físico (BACCOUR et al., 2012).

3 Diversidade de interfaces

Nos capítulos anteriores foram discutidos os obstáculos impostos às redes de sensores sem fios devido à instabilidade característica dos links de comunicação. Foram introduzidos mecanismos capazes de estimar a qualidade destes links e também protocolos de roteamento que, com auxílio destes mecanismos, são capazes de operar de forma mais eficiente. No entanto, estes mecanismos e protocolos têm uma deficiência em comum: não são capazes de melhorar efetivamente a qualidade dos links de comunicação, ao invés disso se limitam a prover diferentes meios para que os links disponíveis sejam melhor utilizados mesmo que estejam operando com baixa qualidade (geralmente visando reduzir o custo energético das operações de comunicação). De fato, nenhum mecanismo baseado puramente em software será capaz de melhorar efetivamente a qualidade dos links, uma vez que são as características físicas dos meios de transmissão que exercem maior influência sobre a qualidade e a estabilidade dos mesmos.

Soluções físicas para a instabilidade dos links geralmente envolvem aumentar a densidade da rede ou a potência de transmissão dos rádios. No entanto, estes métodos resultam em provisionamento excessivo de recursos e nem sempre melhoram a confiabilidade das redes (KUSY et al., 2011).

$$P_t = \prod_{i=0}^n P_i \quad (3.1)$$

Neste capítulo será apresentada uma abordagem alternativa para a solução deste problema: a diversidade de interfaces. Esta abordagem consiste em utilizar, num mesmo nodo, múltiplas interfaces de comunicação independentes, a fim de estabelecer links mais confiáveis. Cabe definir aqui como conjunto de interfaces de comunicação independentes o conjunto de interfaces cuja probabilidade de falha simultânea possa ser descrita pela equação 3.1, onde P_t representa a probabilidade de falha total do link (quando a comunicação através de todas as interfaces independentes falha simultaneamente), P_i representa a probabilidade de falha de uma das interfaces, isoladamente, e n representa o número total de interfaces utilizadas. Para que 3.1 seja verdadeira é necessário que as interfaces que compõem o conjunto sejam selecionadas de forma a impedir que qualquer fator responsável por induzir perturbações na qualidade de um dos links seja capaz de influenciar, simultaneamente, a qualidade dos demais, neste caso $\forall P_i, P_t < P_i$ (JURDAK et al., 2011; KUSY et al., 2011). No caso das interfaces de rádio, a diversidade pode ser obtida utilizando-se interfaces que operem em bandas de frequência distintas; através da utilização de múltiplas antenas, dispostas em posições distintas (JURDAK et al., 2011; KUSY et al., 2011); através da utilização de potências de transmissão distintas em cada uma das interfaces (GUMMESON

et al., 2010); ou ainda, através da utilização de transmissores baseados em tecnologias distintas, como 802.11, 802.15.4 ou Bluetooth (LYMBEROPOULOS et al., 2008; PERING et al., 2006).

Apesar de possibilitar um aumento efetivo na qualidade dos links de comunicação, a diversidade de interfaces implica, potencialmente, em maior consumo energético nos sistemas de comunicação, uma vez que há a possibilidade de n transmissores serem ativados simultaneamente para o envio de cada pacote. É possível, no entanto, utilizar algoritmos destinados especificamente a selecionar de forma dinâmica o subconjunto de interfaces mais adequado para cada transmissão (GUMMESON et al., 2010; LYMBEROPOULOS et al., 2008; PERING et al., 2006), possibilitando um melhor comprometimento entre a qualidade do link e o consumo energético. A seguir serão brevemente analisadas algumas iniciativas relacionadas à diversidade de interfaces.

Kusy et al. (2011) atribui a instabilidade dos links de comunicação nas redes de sensores sem fios aos padrões de ruído e interferência que dominam o ambiente e variam ao longo do tempo. Com o propósito de aumentar a confiabilidade dos links de comunicação nestas condições, os autores propõem uma arquitetura de nodo de sensores sem fios dotada de dois radiotransmissores, operando respectivamente nas bandas de 900MHz e 2.4GHz. É proposta a implementação da diversidade de interfaces através da utilização de bandas de frequência distintas e consideravelmente distantes umas das outras (ao que se refere como diversidade de frequência) e também da separação física das antenas (ao que se refere como diversidade espacial). Os autores propõem ainda um conjunto de alterações na pilha de protocolos do TinyOS (LEVIS et al., 2005), a fim de compatibilizar a operação do SO com a arquitetura proposta. Os resultados obtidos a partir de experimentos práticos realizados utilizando-se nodos baseados na arquitetura sugerida confirmam que a diversidade de interfaces é capaz de aprimorar o desempenho dos meios de transmissão. No entanto, não é possível garantir, somente através dos resultados apresentados, que o desempenho obtido seja ótimo para a arquitetura utilizada, pois não é realizado nenhum tipo de avaliação a respeito do impacto dos protocolos de roteamento utilizados sobre o desempenho geral do sistema, nem comparações de performance utilizando-se outros protocolos.

Gummesson et al. (2010) propõem incrementar a diversidade de interfaces utilizando múltiplos radiotransmissores, que se diferenciam uns dos outros de acordo com sua potência máxima de transmissão. A realização de uma comparação detalhada do consumo energético de transmissores frequentemente utilizados revela que os que são capazes de operar com maior potência de transmissão também possibilitam melhor eficiência energética, em termos de energia consumida por bit transmitido, quando operam próximo à sua potência máxima. Os autores propõem então uma arquitetura dotada de múltiplos radiotransmissores (capazes de operar com potências de transmissão distintas) e um protocolo de roteamento capaz de atribuir o envio de cada pacote de dados à interface mais apropriada. O protocolo

proposto é capaz de atribuir às interfaces de maior potência a comunicação com nodos mais distantes (ou que estejam em posições onde sofrem maior atenuação), já as interfaces de menor potência são atribuídas à comunicação com nodos mais próximos (ou que por alguma outra razão requeiram menor potência para o estabelecimento links confiáveis). Experimentos utilizando diversos padrões de interferência e distribuição espacial dos nodos confirmaram que a solução proposta pode prover adaptação eficaz para uma ampla gama de dinâmicas.

Opal (JURDAK et al., 2011) conta com uma arquitetura de hardware semelhante à proposta por (KUSY et al., 2011), onde são empregados dois radiotransmissores, operando respectivamente nas bandas de 900MHz e 2.4GHz. Contudo, o intuito com o qual Opal implementa a diversidade de interfaces é outro: disponibilizar links de maior alcance e com maior banda, além de buscar também reduzir a latência e eliminar de forma eficaz o gargalo introduzido por arquiteturas que utilizam rotas de comunicação multi-salto em conjunto com nodos equipados com uma única interface para recepção e retransmissão de pacotes.

As aplicações às quais se destinam as redes de sensores sem fios atualmente já evoluíram para muito além da SmartDust (WARNEKE et al., 2001), demandando maior poder computacional dos nodos e maior performance dos meios de comunicação, a fim de permitir a realização de atividades mais complexas como, por exemplo, a captura de imagens ou *streaming* de áudio. A complexidade dos nodos capazes de realizar este tipo de operação eleva seus custos de fabricação, reduzindo a viabilidade de implantações de alta densidade. Neste contexto se justificam propostas como a da arquitetura Opal, que possibilita a implantação de redes menos densas e, ao mesmo tempo, é capaz de disponibilizar maior largura de banda e menor latência, através da utilização de interfaces de comunicação mais avançadas. Jurdak et al. (2011) cita que até recentemente a necessidade vigente era de priorizar a conservação de energia acima de tudo, o que dificultava o desenvolvimento de soluções como Opal. No entanto os avanços na área de *energy harvesting* (ou colheita de energia) e na redução do consumo dos circuitos eletrônicos de baixa potência já permitem que as restrições de consumo energético sejam menos severas, podendo através da utilização de uma pequena placa solar, por exemplo, um dispositivo ser deixado funcionando sem supervisão por diversos anos consecutivos.

Pering et al. (2006) propõe mecanismos para coordenar a utilização simultânea de múltiplas interfaces de comunicação baseadas em tecnologias distintas. Apesar de a proposta ter sido elaborada para dispositivos *mobile*, os conceitos são compatíveis com o ambiente das redes de sensores sem fios. Esta proposta foi motivada pela flexibilidade que a utilização de diversas tecnologias num só dispositivo pode prover para interação entre um grupo heterogêneo de dispositivos (possivelmente redes de sensores sem fios formadas por nodos heterogêneos). Os métodos propostos pelos autores permitem otimizar

o consumo energético da plataforma selecionando a interface mais adequada para cada transmissão, o que é feito de acordo com o formato dos dados a serem transmitidos e com a disponibilidade dos links.

[LyMBERopoulos et al. \(2008\)](#) exploram os desafios de se suportar concomitantemente, num único nodo de sensor, múltiplas interfaces de comunicação, dotadas de diferentes capacidades e barramentos de dados. Com o objetivo de identificar gargalos e *trade-offs* comumente ignorados, os autores realizam um estudo experimental detalhado, utilizando para tal uma plataforma de hardware especialmente desenvolvida. Esta plataforma foi equipada com duas interfaces de comunicação representativas: um radiotransmissor compatível com o padrão 802.11 e um compatível com o padrão 802.15.4. O processador utilizado foi o MSP430F1611, um processador 16bit de baixa potência.

A principal conclusão dos autores foi que deve haver compatibilidade entre as interfaces de comunicação e o processador. No caso da plataforma experimental proposta, o rádio 802.11 utilizado era capaz de uma taxa de transferência muito mais elevada do que o transmissor 802.15.4 (11Mbps versus 250Kbps) e também era muito mais eficiente em termos de consumo durante a transmissão de dados (112 nJ/bit versus 979 nJ/bit). No entanto, o *overhead* causado pela complexidade do barramento que o conectava ao processador, e uma rotina de inicialização demasiadamente complexa, tornaram o custo ponderado para sua utilização muito mais elevado do que aquele para utilização do rádio 802.15.4. Adicionalmente, os autores afirmam que a calibração adequada de certos parâmetros dos protocolos de comunicação como, por exemplo, tamanho dos pacotes e intervalos de transmissão pode resultar em expressiva economia de energia.

4 O padrão IEEE 802.15.4

Como citado anteriormente, a grande diversidade de aplicações às quais se destinam as redes de sensores sem fios gera a demanda por tecnologias de comunicação bastante diversificadas. No entanto, a propagação tardia desta tecnologia à segmentos de mercado que permitissem sua utilização em larga escala favoreceu a disseminação de uma grande quantidade de protocolos de escopo pouco abrangente, destinados a aplicações específicas e que, conseqüentemente, recebiam poucas revisões e aprimoramentos. Nestas condições frequentemente tornava-se mais vantajoso iniciar o desenvolvimento de um novo protocolo do que buscar alternativas suficientemente maduras para integração às soluções finais. Desenvolveu-se de forma semelhante o hardware utilizado para a implementação destes sistemas, o qual costumava ser até recentemente baseado em componentes de uso geral ou originalmente destinados a outras aplicações. Fato este que se devia principalmente à pouca demanda existente para componentes especificamente destinados aos requisitos das redes de sensores sem fios, e que não justificava o esforço de fabricantes para projetar e disponibilizar soluções específicas ao mercado. O projeto e a produção de componentes desta natureza requer processos industriais de alta complexidade, que se tornam financeiramente viáveis somente em maior escala, impossibilitando a obtenção de componentes customizados com o objetivo de integrar somente soluções experimentais ou outras implementações de pequena escala.

O cenário descrito acima trás certas conseqüências negativas para o ecossistema

Tabela 1 – Camadas do modelo OSI

	Camada	Função
Aplicação	7. Aplicação	Tarefas de alto nível, relacionadas aos propósitos específicos do sistema em questão.
	6. Apresentação	Tradução e encapsulamento dos dados que trafegam entre a camada 7, de aplicação, e as demais: codificação, compressão, criptografia.
	5. Sessão	Gerenciamento de fluxos de dados, sequenciamento dos segmentos transmitidos entre dois nodos da rede.
	4. Transporte	Transmissão confiável de segmentos de dados entre dois pontos na rede: segmentação, multiplexação
Transporte	3. Rede	Estruturação e gerenciamento das redes: endereçamento, roteamento e controle de tráfego.
	2. Enlace	Transmissão confiável de pacotes entre dois nodos conectados através de um meio físico
	1. Física	Transmissão e recepção de fluxos brutos através de um meio físico.

de desenvolvimento das redes de sensores sem fios. Mais especificamente: a proliferação de uma grande quantidade de protocolos pouco difundidos impõe uma barreira para a capacidade de interoperabilidade destes sistemas. Adicionalmente, a utilização destes protocolos em aplicações isoladas ou de pequena escala faz com que não existam esforços significativamente abrangentes direcionados para seu aprimoramento, desencorajando a disseminação de soluções de hardware especificamente destinadas à utilização nas redes de sensores sem fios e outros sistemas interconectados de baixa potência.

No entanto a demanda por iniciativas capazes de lidar com estes dilemas tem aumentado. O padrão IEEE 802.15.4 (IEEE. . . , 2003) foi especificamente concebido para utilização em sistemas de comunicação de baixa potência, baixo custo e que operem com baixas taxas de transferência, aos quais se refere como LR-WPANs (*Low Rate Personal Area Networks*). Este padrão destina-se a aplicações que requeiram links de comunicação de curto alcance e alta eficiência energética, sendo nele especificadas implementações para as duas camadas inferiores da pilha de protocolos, como definidas pelo modelo OSI (apresentado na Tabela 1): a camada física (PHY) e a camada de enlace, ou controle de acesso ao meio (MAC). Cada definição de camada PHY conta com especificações a respeito das técnicas de modulação a serem utilizadas, das bandas de frequência compatíveis e das taxas de transferência permitidas, além de definir a quantidade de canais disponíveis, sua largura e o espaçamento entre eles (cada canal representando uma pequena faixa de frequências, dentro do espectro da banda à qual pertence). A arquitetura das camadas superiores é deferida aos diversos protocolos que implementam o IEEE 802.15.4 como, por exemplo, 6LoWPAN (MONTENEGRO et al., 2007), ZigBee (SPECIFICATION, 2005) e WirelessHART (KIM et al., 2008).

O padrão IEEE 802.15.4 define dois tipos de nodos: dispositivos com funcionalidade completa (*full-functioning device*, ou FFD) e dispositivos com funcionalidade reduzida (*reduced-function device*, ou RFD). RFDs são dispositivos dotados de menor capacidade de processamento e memória, localizados nas extremidades das redes e cuja funcionalidade pode se resumir a estabelecer comunicação com algum FFD. Já os FFDs são dispositivos com maior capacidade de processamento e memória, capazes de implementar completamente o padrão, sendo responsáveis por coordenar as atividades de comunicação e roteamento. O IEEE 802.15.4 define ainda o suporte a duas topologias de rede: estrela e *peer-to-peer*. Ao utilizar a topologia estrela todos os nodos devem se comunicar com um dispositivo controlador central, do tipo FFD. Já através da topologia *peer-to-peer* é possível estabelecer links de comunicação entre dois nodos quaisquer, o que permite que se estructurem redes mais complexas, como por exemplo redes *mesh*, onde diversos nodos dispostos de forma potencialmente irregular colaboram para estabelecer rotas de comunicação entre si, mesmo que não sejam capazes de se comunicar diretamente.

A versão original do padrão, IEEE 802.15.4-2003 (IEEE. . . , 2003), propõe somente

duas definições para a camada PHY, permitindo a operação nas bandas de 868 MHz e 915 MHz (através da modulação BPSK, com taxa máxima de transferência de 40 kbps), e na banda de 2.4 GHz (através da modulação O-QPSK, com taxa máxima de transferência de 250kbps). No entanto, devido à sua crescente popularidade, ao longo do tempo diversas revisões e emendas foram adicionadas a este padrão, tendo como objetivo expandir as funcionalidades originalmente previstas pela camada MAC e, com maior frequência, agregar novas definições de camadas PHY.

A primeira revisão aprovada deste padrão, publicada sob o título IEEE 802.15.4-2006 (IEEE. . . , 2006), ocorreu três anos após a aprovação de sua versão original. Esta revisão teve como objetivo a incorporação de suporte a duas novas definições para a camada PHY, a fim de permitir a utilização de taxas de transferência mais elevadas nas bandas de 868 MHz e 915 MHz. Tal aprimoramento se deu através da inclusão de suporte opcional para utilização das técnicas de modulação O-QPSK e ASK nas referidas bandas de frequência, o que possibilitou a obtenção de taxas de transferência equivalentes a 100 kbps e 250 kbps respectivamente. Ainda nesta revisão foram adicionadas definições de mecanismos de segurança e novas funcionalidades à camada MAC, como o suporte para uma base de tempo compartilhada, agendamento do envio de *beacons* e a sincronização de mensagens de *broadcast*.

Apenas um ano após a aprovação desta revisão foi proposta sua primeira emenda, dando origem ao IEEE 802.15.4a (IEEE. . . , 2007). Através desta emenda foram incorporadas mais duas especificações PHY opcionais: o *Chirp Spread Spectrum* (CSS), capaz de elevar a taxa de transferência na faixa de 2450 MHz para 1000 kbps, e a Ultra-wide Band (UWB) destinada à operação nas faixas de 3 GHz, 5 GHz e 6 GHz a 10 GHz, capaz de fornecer taxas de transferência de até 27.4 Mbps.

Ainda com o intuito de possibilitar maior abrangência geográfica ao padrão, apenas dois anos após a aprovação da emenda IEEE 802.15.4a, foram introduzidas as emendas IEEE 802.15.4c (IEEE. . . , 2009a) e IEEE 802.15.4d (IEEE. . . , 2009b), destinadas a introduzir novas definições para a camada PHY, compatíveis com a operação nas bandas de frequência disponíveis na China e no Japão. IEEE 802.15.4c introduz definições para operação na banda de frequência de 780 MHz, assim como adequações na camada MAC a fim de compatibilizar o padrão com as regulamentações vigentes na China, na época de sua publicação. Já o IEEE 802.15.4d define suporte à operação na banda de 950 MHz assim como adequações necessárias na camada MAC a fim de permitir a operação de acordo com as regulamentações vigentes no Japão, na época de sua publicação. Estas duas emendas foram incluídas na revisão seguinte, o IEEE 802.15.4-2011 (IEEE. . . , 2011), cujas definições de camada PHY suportadas são apresentadas na [Tabela 2](#).

No entanto, em se tratando de padronização dos meios de difusão via radiofrequência, o maior empecilho encontrado está justamente relacionado às divergências presentes nas

regulamentações locais existentes em cada país. A exemplo dos motivadores para as revisões IEEE 802.15.4c e IEEE 802.15.4d, a alocação de bandas de frequência pode variar de acordo com as leis de cada país, exigindo certa flexibilidade dos padrões que visem permissão para operar globalmente. No caso do IEEE 802.15.4, a grande maioria as definições de camada PHY são destinadas à operação nas bandas ISM (*Industrial, Scientific an Medical*), bandas de frequência internacionalmente reservadas para fins industriais, científicos e médicos, não necessariamente relacionados à transmissão de dados e que, por este motivo, apresentam menor variabilidade quanto as bandas de frequência alocadas nas diferentes regiões do planeta. Adicionalmente, devido à finalidade para qual são destinadas, as regulamentações que incidem sobre as bandas ISM tendem a ser mais permissivas quanto à irradiação por equipamentos não licenciados.

Contudo, a partir da introdução das definições do PHY UWB, no IEEE 802.15.4-2011, houveram algumas exceções quanto à utilização de bandas de frequência fora do escopo das bandas ISM. O sinal de transmissão associado ao PHY *Ultra-wide Band* (UWB) possui ocupação espectral instantânea superior a 500 MHz e largura fracionária de banda superior a 20%, o que permite alta eficiência espectral e altas taxas de transferência com baixo consumo energético, além de proporcionar alta tolerância aos efeitos da propagação multi-caminho (PORCINO; HIRT, 2003). Estas características, no entanto, fazem com que

Tabela 2 – Definições PHY do IEEE 802.15.4 Rev.2003, Rev.2006 e Rev.2011

Revisão	PHY	Banda de frequência (MHz)	Modulação	Taxa de transferência (kb/s)
2003	868/915	868 - 868.6	BPSK	20
		902 - 928	BPSK	40
	2450	2400 - 2483.5	O-QPSK	250
2006	868/915	868 - 868.6	ASK	250
		902 - 928	ASK	250
	868/915	868 - 868.6	O-QPSK	100
		902 - 928	O-QPSK	250
2011	780	779 - 787	O-QPSK	250
		779 - 787	MPSK	250
	950	950 - 956	GFSK	100
		950 - 956	BPSK	20
	2450 DSSS	2400 - 2483.5	O-QPSK	250
	2450 CSS	2400 - 2483.5	CSS/D-QPSK	250
				1000
	UWB sub-gigahertz	250 - 750	BPM/BPSK	110, 850, 6800, 27240
	UWB low band	3244 - 4742		
	UWB high band	5944 - 10234		

UWB requeira maior largura de banda do que a disponibilizada nas faixas de frequência ISM. Adicionalmente, as técnicas de transmissão utilizadas pelo UWB baseiam-se em pulsos de rádio extremamente curtos, emitidos através de sequências periódicas, o que torna a tecnologia inadequada para utilização em certos ambientes de alta periculosidade, devido à emissão de pulsos de alta energia. UWB também não é adequada para transmissões de longa distância (RAWAT et al., 2014).

A popularidade adquirida pelo IEEE 802.15.4 continua a motivar o surgimento de novas emendas e revisões para este padrão. Até a data em que foi conduzido este estudo, a última revisão aprovada era a IEEE 802.15.4-2015 (IEEE. . . , 2016a), realizada com o intuito de introduzir as emendas propostas em IEEE 802.15.4e (IEEE. . . , 2012a), IEEE 802.15.4f (IEEE. . . , 2012) e IEEE 802.15.4g (IEEE. . . , 2012b). Em relação à revisão publicada em 2011, esta última versão adiciona uma variedade de novas definições para técnicas de modulação, esquemas de codificação e bandas de frequência, com o objetivo de oferecer suporte a uma variedade de aplicações como: RFID (*Radio Frequency Identification*), SUNs (*Smart Utility Networks*), LECIM (*Low Energy Critical Infrastructure Monitoring*) e RCC (*Rail Communications and Control*), além de expandir o suporte para utilização de bandas de frequência antes destinadas à difusão de sinais de TV analógica e que atualmente encontram-se ociosas, às quais se refere como TVWS (*TV White Space*). Um resumo das definições de camada física suportados por esta revisão encontram-se na Tabela 3. Há ainda diversas propostas de emenda aguardando a publicação de uma próxima revisão. Dentre elas se destaca o IEEE 802.15.4q (IEEE. . . , 2016c), cujo foco é no suporte às definições de PHYs *Ultra Low Power* (ULP), destinados a dispositivos de baixo consumo, alimentados por baterias e com previsão de vida útil de vários anos.

Para que um dispositivo seja considerado compatível com o padrão IEEE 802.15.4 é necessário que forneça suporte completo a pelo menos uma das especificações das camadas PHY e MAC nele definidas, podendo opcionalmente oferecer suporte a mais de uma especificação. A escolha de quais especificações utilizar varia, e é baseada nas necessidades específicas de cada aplicação.

Tabela 3 – Definições PHY do IEEE 802.15.4-2015

PHY	Banda de frequência (MHz)	Modulação	Taxa de transferência (kb/s)
O-QPSK	868	O-QPSK	100
	780, 915, 2380, 2450		250
BPSK	868	BPSK	20
	915		40
ASK	868, 915	ASK/PSSS	250
CSS	2450	CSS/ D-QPSK	250, 1000
HRP-UWB	HRP-UWB (sub-gigahertz)	BPM/BPSK	110, 850, 6800, 27240
	HRP-UWB (low-band)		
	HRP UWB (high-band)		
MPSK	780	MPSK	250
GFSK	920	GFSK	100
MSK	2450	MSK	250
	433		31.25, 100, 250
LRP-UWB	LRP UWB	PPM	31.25
		OOK	250, 1000
SUN FSK	169	2-FSK	2.4, 4.8
		4-FSK	9.6
	450	2-FSK	4.8
		4-FSK	9.6
	470, 780, 863	2-FSK	50, 100
		4-FSK	200
	896, 901, 928, 1427	2-FSK	10, 20, 40
	915, 917, 2450		50, 150, 200
SUN OFDM	470, 780, 863, 915, 917, 920, 2450	BPSK	50, 100, 200
		QPSK	50, 100, 150, 200, 300, 400, 800
		16-QAM	200, 300, 400, 600, 800
SUN O-QPSK	470, 868, 920	O-QPSK	6.25, 12.5, 25, 50
	780, 915, 917, 2450		31.25, 125, 250, 500
LECIM DSSS	470, 780, 863, 915, 922, 917, 920, 921, 2450	BPSK/ O-QPSK	<500

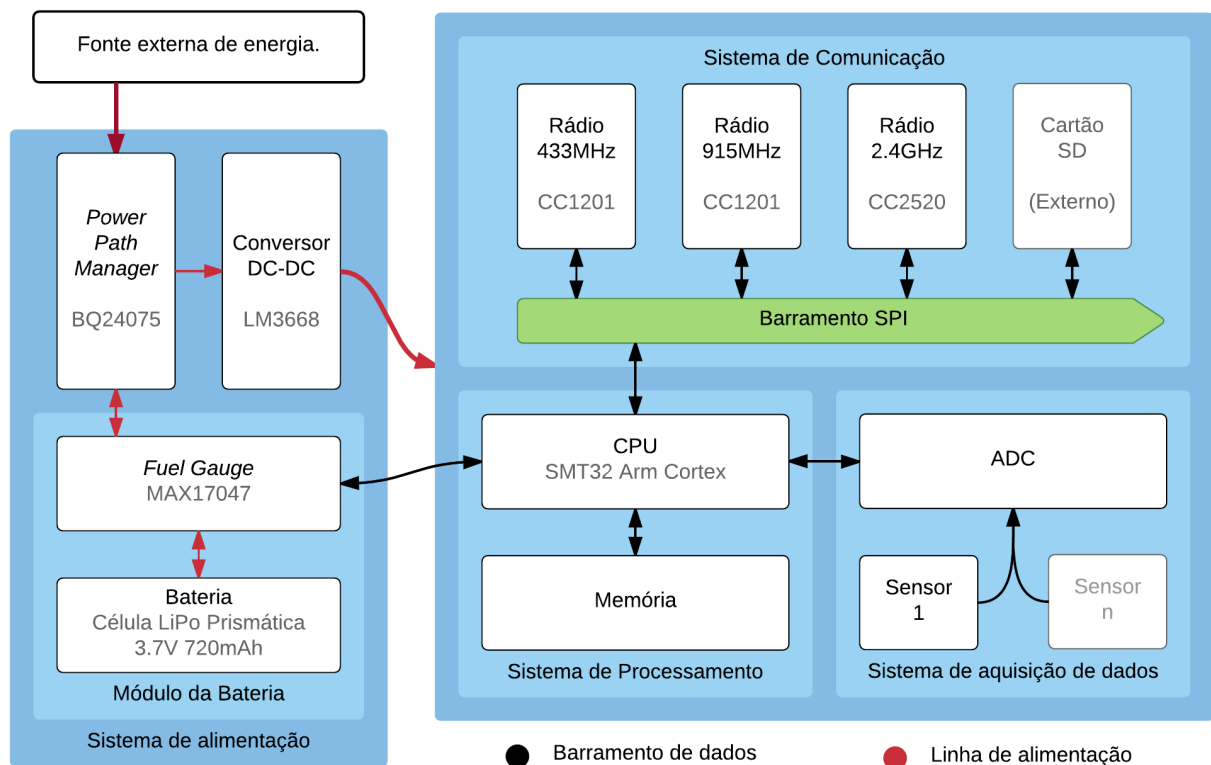
Tabela 3 – Definições PHY do IEEE 802.15.4-2015 (continuação)

LECIM FSK	169	FSK/P-FSK	12.5, 25
	433, 470, 780, 863, 915, 922, 917, 920, 921		12.5, 25, 37.5
TVWS FSK	Definições regionais podem variar.	2-FSK	50, 100, 200, 300
		4-FSK	400
TVWS OFDM	Definições regionais podem variar	BPSK	390.625, 1562.5
		QPSK	781.50, 3125
		16-QAM	1562.5, 6250
TVWS NB-OFDM	Definições regionais podem variar.	BPSK	156, 234
		QPSK	312, 468
		16-QAM	624, 936
		64-QAM	1404, 1638
RCC LMR	161, 216, 217, 220, 450, 770, 800, 806, 896, 915, 928	LMR GMSK	9.6, 19.2
		LMR 4-FSK	9.6, 19.2, 38.4
		LMR Q-PSK	16, 32
		LMR $\pi/4$ DQPSK	16, 32, 36
	915, 2450, 4965, 5800	LMR DSSS BPSK	Opcional
	915, 4965, 5800	LMR DSSS DPSK	Opcional
RCC DSSS	161, 216, 217, 220, 450, 770, 800, 806, 896, 915, 928, 2450, 4965, 5800	DSSS BPSK	Baseado nas mesmas definições do PHY BPSK.

5 PhyNode

Este trabalho propõe utilizar múltiplas interfaces de comunicação para otimizar a troca de dados entre nodos de redes de sensores sem fios baseadas no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE. . . , 2016b). Atualmente não existem sistemas disponíveis comercialmente que implementem esta abordagem e, portanto, suas contribuições serão propostas em duas etapas: a primeira consistindo no projeto e na construção de protótipos do *hardware* para uma plataforma de desenvolvimento compatível com a utilização de múltiplas interfaces de comunicação. Esta plataforma deverá permitir a realização de ensaios práticos para avaliação dos conceitos propostos, além de possuir a instrumentação necessária para obtenção de estatísticas pertinentes à validação dos mesmos. Após a obtenção da referida plataforma, no Capítulo 6, serão propostos mecanismos de controle baseados em software, capazes de operar de forma eficiente em nodos baseados na referida arquitetura.

Figura 5 – Arquitetura da plataforma PhyNode.



Fonte: Elaboração própria.

Com este objetivo introduz-se aqui a plataforma PhyNode. Esta plataforma é composta por dois módulos principais: processamento e sistemas. A Figura 5 ilustra sua arquitetura completa. Esta arquitetura foi baseada no modelo genérico, introduzido na

Figura 1. No entanto, alguns refinamentos foram acrescentados de forma a atualizá-la com as tecnologias mais atuais, disponíveis no universo da eletrônica embarcada de baixa potência, e equipá-la para realizar os ensaios que serão propostos na segunda etapa deste trabalho.

5.1 Sistema de processamento

O módulo de processamento contém o sistema de processamento e a instrumentação necessária para programação e depuração do microcontrolador (MCU). Optou-se para este módulo pela utilização de uma placa de desenvolvimento comercialmente disponível, a STM32Nucleo 64, fabricada pela ST[®] Microelectronics. Estas placas contam com uma conexão USB utilizada para programação, depuração e, se necessário, alimentação; possuem ainda interfaces compatíveis com as do Arduino Uno Rev.3TM, e conectores MorphoTM (que disponibilizam acesso a todos os pinos da MCU e às linhas de alimentação disponíveis na placa). Convenientemente são disponibilizados diferentes modelos desta placa, com o mesmo *form-factor*, porém equipadas com diferentes MCUs da linha STM32TM.

O segundo módulo da plataforma PhyNode, o módulo de sistemas, consiste num *shield*, projetado para encaixar-se diretamente nos conectores Morpho das placas STM32Nucleo 64.

5.2 Sistemas de alimentação

Certos refinamentos introduzidos pela plataforma PhyNode encontram-se no módulo de sistemas. A começar pelo sistema de alimentação, uma vez que a eficiência dos demais componentes depende fortemente dele. A seguir serão discutidos dois novos componentes adicionados a este sistemas: o *Power Path Manager* e a *Fuel Gauge*. Posteriormente serão justificadas as escolhas feitas em relação aos demais componentes, e os avanços obtidos com a nova arquitetura serão discutidos.

- *Power Path Manager (PPM)*. Este componente é responsável por distribuir da maneira mais eficiente possível a energia disponível. Nos protótipos construídos para avaliação da arquitetura proposta, esta funcionalidade é provida pelo chip BQ24075, produzidos pela Texas InstrumentsTM. Este chip utiliza o sistema DPPM (*Dynamic Power Path Management*) capaz de alimentar o sistema enquanto simultânea e independentemente carrega a bateria. O algoritmo utilizado pelo DPPM prioriza o fornecimento de energia ao circuito de saída (linhas de alimentação dos demais sistemas). Caso detecte que a voltagem no circuito de entrada (conexão USB, painel solar etc.) começou a cair em decorrência de uma limitação de potência, ele reduz a

corrente de carga da bateria. Desta forma é possível priorizar o fornecimento de potência aos demais sistemas, enquanto a corrente de carga da bateria é constantemente calibrada a fim de aproveitar toda a potência disponível no circuito de entrada. Este sistema também permite que a bateria seja utilizada para suplementar a corrente fornecida pelo circuito de entrada durante picos de consumo do sistema. Quando não há uma fonte conectada ao circuito de entrada, a bateria fornece toda a energia consumida (Texas Instruments, 2014).

Adicionalmente é interessante ressaltar que o carregamento de baterias de lítio geralmente requer circuitos dedicados e razoavelmente complexos e precisos, a fim de evitar danos à bateria ou incêndio. O BQ24075 já integra estes circuitos, reduzindo a contagem de componentes total do sistema e economizando algum espaço na superfície da placa de circuito impresso so *shield*.

- *Fuel Gauge*. Este componente provê PhyNode com uma nova funcionalidade: monitorar digitalmente, e com precisão, o estado de carga da bateria. Para esta finalidade a arquitetura proposta utiliza o chip MAX17047, produzido pela Maxim IntegratedTM. Este chip conta com o sistema ModelGaugeTMm3, capaz de monitorar simultaneamente a corrente que circula pela bateria e sua voltagem. Neste sistema, dois algoritmos internamente compensados são utilizados para calcular o estado de carga da bateria. O primeiro deles, conhecido como contador de Coulomb, consiste num circuito integrador que monitora a voltagem e a intensidade da corrente que circula pela bateria ao longo do tempo. Sabendo-se quanta energia fluiu para o interior da bateria, qual a potência consumida ao longo do tempo e, compensando estes valores com coeficientes específicos para a química utilizada na bateria em questão, é possível calcular qual é o seu estado de carga presente.

A Maxim IntegratedTM alega, no entanto, que este sistema, apesar de apresentar resultados mais precisos a curto prazo, apresenta problemas de precisão a longo prazo. Isto se deve, principalmente, às tolerâncias de certos componentes do circuito utilizado para aferição da corrente (mais precisamente um resistor *shunt* que não pode ser integrado ao *chip*, e o traçado das trilhas na placa de circuito impresso). O segundo algoritmo, nomeado ModelGaugeTM, é um algoritmo proprietário desenvolvido pelo fabricante, baseado somente no monitoramento da voltagem da bateria, que é alegadamente mais preciso a longo prazo.

As leituras fornecidas pelo MAX17047 combinam resultados obtidos a partir destes dois algoritmos com fatores de compensação adicionais que dizem respeito a temperatura e ao envelhecimento da bateria. Através deste chip é possível ainda monitorar outros parâmetros do sistema como: consumo instantâneo e o tempo restante para o carregamento ou descarregamento completo da bateria.

- *Conversor DC-DC.* O conversor DC-DC desempenha um papel importante para a eficiência energética do sistema. Todo processo de conversão de voltagem ocorre com eficiência inferior a 100%, indicando que há um custo relacionado à regulação das linhas de alimentação. Porém, mais que isso: quer dizer que este custo é proporcional ao consumo dos sistemas, e que a eficiência de qualquer componente alimentado pelo conversor também é afetada. Em suma, a eficiência global da plataforma depende da escolha de um sistema de conversão adequado.

A utilização de conversores DC-DC é necessária pois as voltagens fornecidas por baterias variam de acordo com seu estado de carga, com a intensidade da corrente consumida e até mesmo de acordo com a temperatura. A maioria dos circuitos de baixa potência atuais, por exemplo, atua na faixa de 3.3 volts. Já as baterias de lítio comumente utilizadas para alimentar os nodos de sensores, podem fornecer voltagens que variam entre 4.2 volts, quando totalmente carregadas, a 2.8 volts em seu estado de carga mais baixo.

O conversor DC-DC selecionado para equipar os protótipos de *PhyNode*, Texas Instruments LM3668SD-2883, é capaz de manter a regulação de voltagem de saída em 3.3 volts a partir de toda a faixa de voltagem fornecida pela baterias de lítio que equipam os protótipos, sendo capaz de reduzir eficientemente a voltagem de entrada quando esta se encontrar acima dos 3.3 volts e elevá-la quando encontrar-se abaixo.

5.3 Sistema de comunicação

O maior diferencial da plataforma *PhyNode*, no entanto, é seu sistema de comunicação, capaz de operar através de múltiplas interfaces de comunicação simultaneamente. A seguir serão apresentados os componentes utilizados neste sistema e serão discutidos os avanços obtidos e as capacidades dos mesmos.

A começar pela escolha dos rádios: o módulo de sistemas da plataforma *PhyNode* conta com três radiotransmissores operando em frequências distintas e razoavelmente espaçadas, sendo elas 433MHz, 915MHz e 2.4GHz. A escolha destas frequências foi crucial para o processo de desenvolvimento dos protótipos, uma vez que influencia diretamente em alguns aspectos do seu projeto como, por exemplo, restrições legais para operação e licenciamento de bandas, logística para aquisição de *hardware* e outros. Os principais requisitos estabelecidos foram:

- *Espalhar o espectro de transmissão tanto quanto possível.* A principal idéia por trás da diversidade de interfaces é implementar dois ou mais links paralelos e independentes, de modo que a probabilidade de todos os links falharem simultaneamente seja pequena. Links independentes podem ser obtidos, por exemplo, utilizando-se faixas

de frequência diferentes (KUSY et al., 2011). Quanto maior o espaçamento entre faixas de frequência utilizadas, menor será a dependência entre os links.

- *Utilizar apenas bandas ISM.* As faixas de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) são faixas de frequência internacionalmente disponibilizadas para utilização por aplicações industriais, científicas e médicas. Não necessariamente relacionadas a sistemas de telecomunicação. A utilização destas bandas é preferida por não haver grandes restrições legais quanto à irradiação nas mesmas. No entanto, este benefício leva também à sua maior desvantagem, que é a grande probabilidade de sofrer interferências externas, causadas por outros sistemas operando em frequências similares, notadamente redes WiFi e eletrodomésticos como, por exemplo, fornos micro-ondas (KUSY et al., 2011; SRINIVASAN et al., 2008). O espalhamento espectral ajuda a mitigar este problema.
- *Não impor grandes restrições à construção física dos nodos.* O projeto de placas de circuito capazes de conduzir adequadamente os sinais de alta frequência é em si um grande desafio. Fatores que antes não importavam como, por exemplo, a geometria das trilhas, sua impedância característica e a espessura da placa, devem ser considerados. Ignora-los significaria incorrer em grandes perdas de eficiência ou até mesmo na completa inutilização dos circuitos de transmissão. As exigências técnicas para obter-se circuitos eficientes são diretamente proporcionais à frequência. Por este motivo frequências superiores a 2.4GHz foram evitadas.
- *Ser compatível com transmissores 802.15.4 eficientes e disponíveis comercialmente.* A eficiência dos links de comunicação depende muito do hardware utilizado. Escolher o transmissor mais adequado é, assim como tantos outros aspectos do projeto de sistemas de hardware e software, uma questão de *co-design* de hardware e software. Porém neste caso limitada pela disponibilidade de produtos comercialmente disponíveis.

Adicionalmente, num sistema dotado de múltiplas interfaces, o ideal é que o formato dos barramentos de comunicação entre as diversas interfaces e a MCU seja o mais uniforme possível (LYMBEROPOULOS et al., 2008). Devido à grande distância entre as faixas de frequência utilizadas nas três interfaces da plataforma PhyNode, não foi possível encontrar um único modelo de transmissor que fosse capaz de lidar com todas elas. No entanto foram escolhidos modelos com arquiteturas compatíveis entre si e equipados com interfaces de comunicação semelhantes.

O CC1201, produzido pela Texas Instruments, é um transmissor de baixa potência, capaz de operar em todas as faixas de frequência ISM Sub 1GHz. Este transmissor conta

¹ Corrente de pico para frequência de transmissão 915MHz a +14dBm.

² Corrente média consumida utilizando o sistema eWOR (*enhanced Wake On Radio*) operando a 1Hz.

Tabela 4 – Comparativo de radiotransmissores

Modelo	Frequência	Banda	Modulação	TX	RX	Potência
CC1000	1 ~ 3 GHz	76.8 Kbps	2-FSK	18.5 mA	9.6 mA	10 dBm
nRF903	433 / 915 MHz	76.8 Kbps	GFSK	19.5 mA	22.5 mA	10 dBm
TR1000	916 MHz	115.1 Kbps	OOK, ASK	12.0 mA	3.8 mA	0 dBm
CC1201	ISM Sub 1GHz	1.25 Mbps	2-FSK, 2-GFSK, 4-FSK, 4-GFSK, MSK, OOK	46.0 mA ¹	8.0 uA ²	16 dBm
CC2420	2.4 GHz	250 Kbps	DSSS, O-QPSK	17.4 mA	19.7 mA	0 dBm
CC2500	2.4 GHz	512 Kbps	2-FSK	12.8 mA	21.6 mA	1 dBm
CC2520	2.4 GHz	250 Kbps	O-QPSK	33.6 mA	18.8 mA	5 dBm

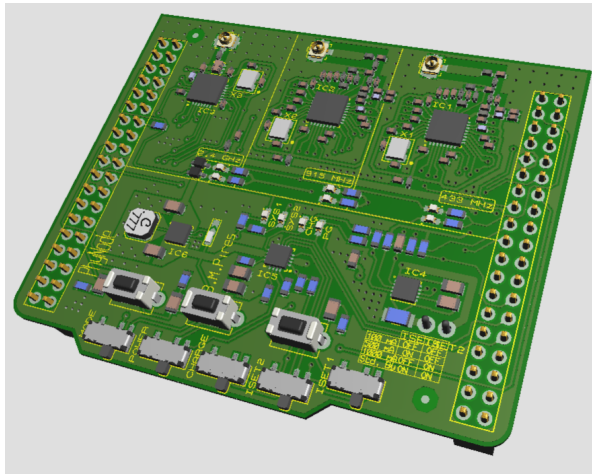
Fonte: Adaptado de ([BACCOUR et al., 2012](#))

com avançadas funcionalidades implementadas em hardware, como *engine* criptográfica AES de 128bits, *Clear Channel Assessment* (CCA) e um sistema de *Wake on Radio* (eWOR) que provê baixo consumo no modo de escuta. Este modelo foi selecionado para implementação das interfaces operando nas frequências 433MHz e 915MHz. O CC1201, no entanto, não é capaz de operar na faixa de 2.4GHz, utilizada pela terceira interface. Neste caso foi utilizado outro modelo, o CC2520, também produzido pela Texas Instruments, dotado de funcionalidades semelhantes, porém adicionalmente compatível com o protocolo ZigBee®. Na [Tabela 4](#), expandida a partir de dados presentes em ([BACCOUR et al., 2012](#)), encontra-se um comparativo entre os modelos selecionados e alguns outros comumente utilizados.

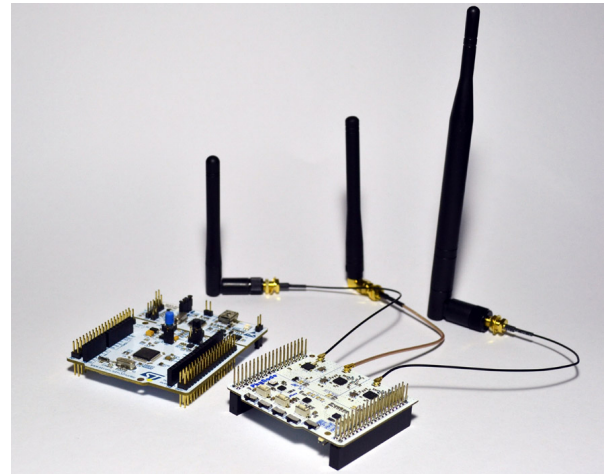
A fim de prover uma arquitetura modular e expansível para a plataforma *PhyNode*, os três radiotransmissores são conectados ao mesmo barramento SPI (*Serial Peripheral Interface*) e a MCU dedica uma de suas interfaces de comunicação exclusivamente a este barramento. A conexão de interfaces externas adicionais também é suportada. A comunicação entre os transmissores e a MCU é incrementada através do uso de pinos de interrupção programáveis. O CC2520 conta com seis destes pinos, e o CC1201 conta com três deles. Já as MCUs permitem que a maioria de seus pinos sejam conectados programaticamente a alguns barramentos internos de interrupção, capazes de operar com diferentes níveis de prioridade. A utilização de pinos de interrupção programáveis possibilita a notificação quase instantânea de diversos eventos, sem que seja necessário para isso utilizar o barramento de comunicação e rotinas de *pooling*, o que viabiliza a implementação de rotinas de tratamento mais eficientes e de menor latência. Este recurso também torna possível que componentes aguardem certos eventos em modo de baixo consumo, sendo acordados através das interrupções quando necessário.

A [Figura 6a](#) apresenta uma modelagem 3D do *shield* de sistemas da plataforma *PhyNode*, disponibilizada pelo software CAD utilizado para seu projeto. Pode-se reparar

Figura 6 – Protótipos do módulo PhyNode



(a) Simulação 3D da montagem final do módulo PhyNode no software Proteus (CAD)



(b) Módulo de comunicação PhyNode, a esquerda. Do lado direito uma Nucleo Board.

Fonte: Elaboração própria.

nos três circuitos de transmissão, situados na parte superior do shield. A [Figura 6b](#) apresenta o primeiro protótipo já montado, com as respectivas antenas conectadas, a direita o *shield* de sistemas e a esquerda uma STM32Nucleo.

6 PhyMAC

No capítulo anterior foi apresentada a arquitetura da plataforma PhyNode, que implementa a diversidade de interfaces a fim de prover suporte ao estabelecimento de links de comunicação mais robustos, através da utilização de múltiplas interfaces operando em bandas de frequência distintas. No entanto, para que as aplicações em execução nesta plataforma possam beneficiar-se diretamente da arquitetura proposta é necessário que haja uma abstração das diferentes interfaces disponíveis, permitindo que as tarefas relacionadas à multiplexação dos pacotes de dados e seleção das interfaces de transmissão sejam delegadas às camadas mais baixas da pilha de protocolos.

Com este objetivo é proposto PhyMAC, uma extensão da camada MAC do padrão IEEE 802.15.4-2015, destinada especificamente a prover uma abstração das diferentes interfaces de comunicação disponíveis em PhyNode, de forma a permitir que as aplicações operando nesta plataforma possam acessar as interfaces de comunicação de forma transparente. PhyMAC realiza a transmissão dos pacotes de dados através de um conjunto composto por uma ou mais interfaces, selecionadas dinamicamente de forma a maximizar as chances de entrega e minimizar o consumo energético, sem que seja necessário para a aplicação realizar uma seleção explícita de quais interfaces utilizar para o envio de cada pacote. No entanto, em casos específicos, é também permitido selecionar explicitamente quais interfaces utilizar adicionando-se os *Information Elements* (IEs) apropriados aos *frames* de tipo *Enhanced Beacon* e *Data*, construídos da forma como são definidos em (IEEE. . . , 2016a, 7. MAC frame formats).

Quanto à implementação dos algoritmos de seleção, destinados a operar em conjunto com o sistema de diversidade de interfaces, deve-se primeiramente considerar quais *trade-offs* serão priorizados. No caso da arquitetura PhyNode, a amplitude espectral possibilitada pela presença de três radiotransmissores operando em bandas de frequência bastante espaçadas permite que, ao utilizá-las simultaneamente, sejam obtidos links de altíssima qualidade (como será demonstrado no capítulo 7). No entanto, a utilização simultânea de múltiplas interfaces de comunicação é uma tarefa bastante dispendiosa em termos de consumo energético. Adicionalmente, apesar de aumentar consideravelmente as chances de que um pacote seja entregue com sucesso, esta abordagem tem o potencial para gerar grandes volumes de transmissões redundantes, uma vez que é provável que em muitos casos o mesmo pacote de dados chegue ao nodo receptor através de mais de uma interface, devendo ser posteriormente descartado pela camada MAC. O processamento adicional requerido para o descarte de grandes quantidades de pacotes redundantes, além de aumentar o consumo de energia no nodo receptor e elevar sua carga de processamento, pode ocasionar o congestionamento das linhas de interface entre os radiotransmissores e o

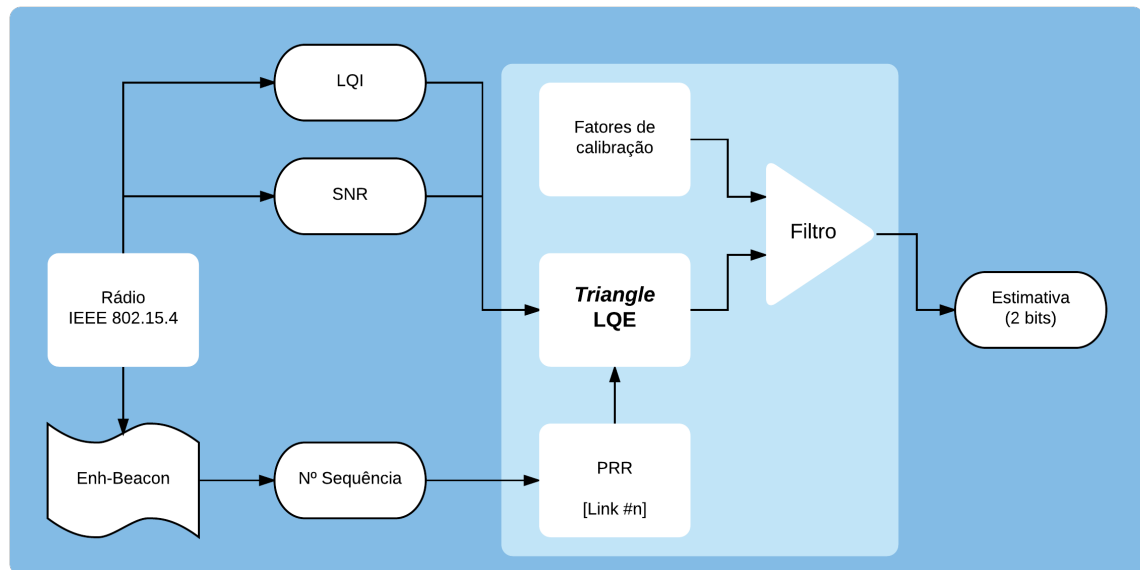
microcontrolador.

Considerando-se que a amplitude espectral provida pela combinação das interfaces que equipam PhyNode seja suficiente para que, a qualquer momento, ao menos uma de suas interfaces seja capaz de transmitir com sucesso um pacote de dados a um outro nodo qualquer, conclui-se que a variável a ser otimizada por PhyMAC será o consumo de energia originado pela transmissão de pacotes através de múltiplas interfaces, tendo como meta a redução do número de interfaces através das quais cada pacote é transmitido. Considera-se ainda, nestas condições e para fins de projeto, como nula a possibilidade de perda de pacotes caso sejam utilizadas simultaneamente todas as interfaces. Em situações reais, caso isto aconteça, mecanismos presentes em camadas superiores devem se responsabilizar por retransmitir o pacote perdido. As responsabilidades do algoritmo de seleção utilizado por PhyMAC resumem-se a: (i) evitar que pacotes de dados sejam transmitidos através de interfaces cuja qualidade momentânea do link esteja abaixo dos patamares desejados e (ii) evitar que pacotes de dados sejam transmitidos simultaneamente através de múltiplas interfaces cuja qualidade momentânea do link esteja elevada. Idealmente cada pacote enviado por PhyMAC deverá ser transmitido através de uma única interface, sendo entregue com sucesso. No pior caso, no entanto, o mesmo pacote será transmitido simultaneamente através de todas as interfaces, sendo também recebido com redundância.

Para que o algoritmo empregado por PhyMAC seja capaz de realizar suas funções de forma eficiente, conta com dois mecanismos essenciais: um LQE, capaz de estimar individualmente a qualidade de cada um dos links disponíveis, e um algoritmo lógico que combina a estimativa de qualidade de cada um dos links disponíveis, elegendo o conjunto de interfaces através do qual as transmissões deverão ser realizadas.

A fim de tornar PhyMAC diretamente compatível com os protocolos que implementam o padrão IEEE 802.15.4 buscou-se utilizar, em seu processo de implementação, somente dados provenientes das camadas PHY e MAC, fator que guiou a seleção do algoritmo de estimativa de qualidade utilizado. Na literatura existem diversas propostas de estimadores de qualidade capazes de prever o comportamento de um link com a estabilidade e reatividade requeridas por PhyMAC, no entanto o estimador proposto em [Boano \(2010\)](#), ao qual se deu o nome de *Triangle*, foi o que se demonstrou mais adequado. *Triangle* é uma métrica baseada nos valores de PRR, SNR e LQI, que considera um histórico de tamanho configurável e pode ser recalculada a cada pacote recebido, resultando em um valor adimensional diretamente proporcional à qualidade esperada do link.

A lógica complementar de seleção implementada acima do LQE *Triangle* considera somente três possíveis estados do link: (i) ÓTIMO, (ii) BOM, (iii) RUIM. No entanto a implementação do LQE utilizada em PhyMAC armazena a estimativa obtida num inteiro sem sinal, de 32bits. A fim de compatibilizar a interface destes dois algoritmos foram introduzidos fatores de calibração que determinam quais valores resultantes do LQE classi-

Figura 7 – Algoritmo de seleção PhyMAC - *Triangle*

Fonte: Elaboração própria

ficarão determinado link como *ÓTIMO*, *BOM* ou *RUIM*. O processo completo encontra-se ilustrado na Figura 7. O algoritmo complementar de seleção recebe a classificação de cada um dos links disponíveis e gera um byte de seleção da seguinte forma:

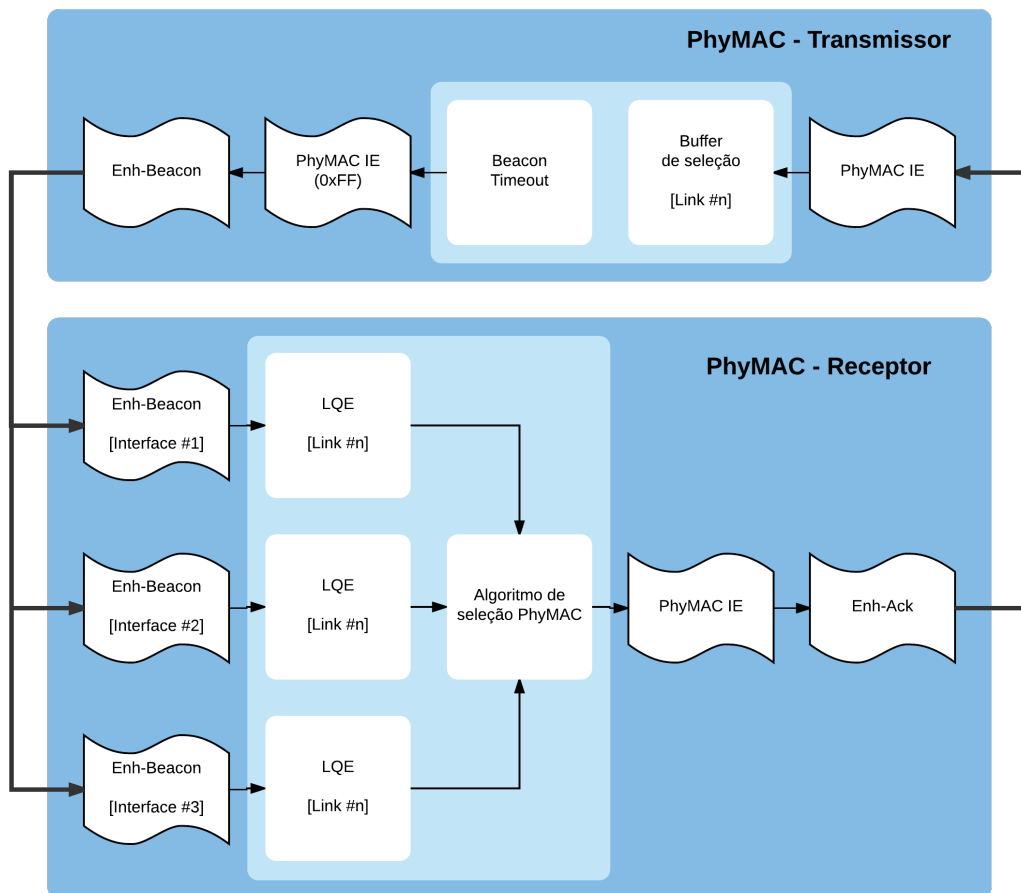
- Se houver um ou mais links classificados como *ÓTIMO*, a interface correspondente ao primeiro destes links será selecionada.
- Se a primeira regra não tiver sido acionada e houver um ou mais links classificados como *BOM*, as interfaces correspondentes a estes links serão selecionadas.
- Caso nenhuma das regras acima tenha sido ativada, todas as interfaces são selecionadas.

A utilização da métrica *Triangle* trás, no entanto, um complicador: ela deve ser calculada na extremidade do link em que se encontra o receptor. A seleção de interfaces para envio, no entanto, deve ser realizada na extremidade oposta. Foi introduzido, por esta razão, um mecanismo de sincronização, capaz de informar ao nodo transmissor quais interfaces devem ser utilizadas para envio dos próximos pacotes. Esta funcionalidade é implementada através de um mecanismo previsto pelo padrão IEEE 802.15.4-2015 através do qual é possível adicionar campos de informação opcionais a alguns formatos de *frame* padrão, como os *Enhanced Beacon*, *Enhanced ACK* e *Data*. Isto é feito através da inserção de *subframes* denominados *Information Elements* (IEs).

Tabela 5 – *PhyMAC IEEE 802.15.4 Information Element*

Bits: 0-6	7 - 14	15	16 - 23	24 - 31	32 - 39
0x03	0x00	0	0xAA	0x03	0x07
IE Header			PhyMAC ID	Nº Interfaces	Seletor

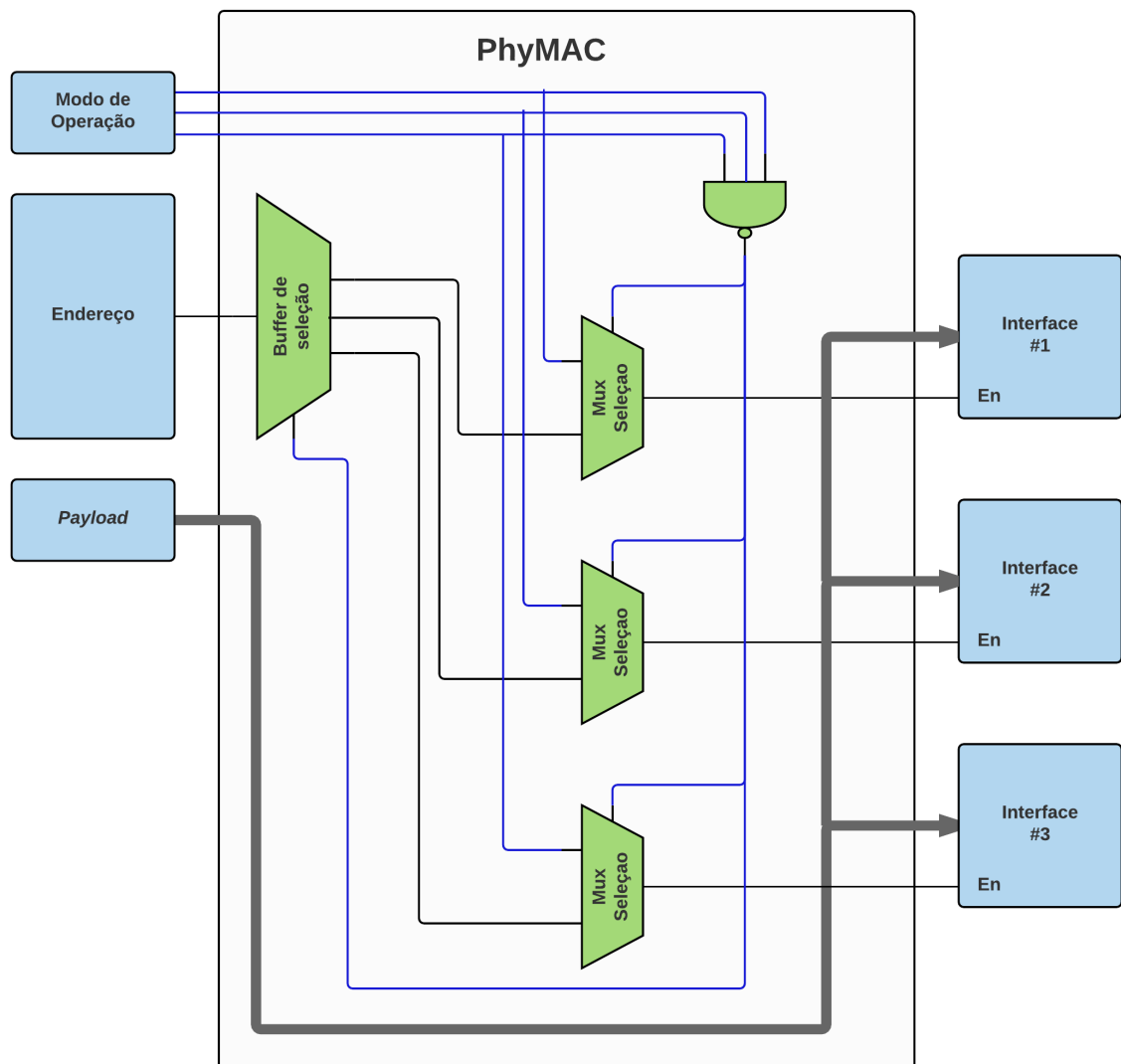
Foi definido um formato específico de *Information Element* utilizado por *PhyMAC* para comunicar a seleção de interfaces, o qual é exemplificado na [Tabela 5](#). Seu *header* especifica que é um IE do tipo *Vendor Specific*, destinado a utilização por implementações de terceiros, e cujo tamanho do *payload* é (neste caso) 3 bytes. O primeiro byte da *payload* é somente um *marker*, que serve para distinguir este IE de outros. Segue-se um byte que especifica quantas interfaces tem seu estado definido neste IE. Os próximos n bytes contêm as definição de estado de cada uma das interfaces especificadas: cada bit "1" significa que a interface deve ser utilizada e cada bit "0" significa que a interface não deve ser utilizada. Caso mais de 8 interfaces sejam especificadas, mais bytes devem ser adicionados ao fim deste IE.

Figura 8 – Algoritmo de seleção *PhyMAC* - Processo de sincronização

Fonte: Elaboração própria

O processo de sincronização entre receptor e transmissor, ilustrado na [Figura 8](#), é baseado na troca de IEs entre nodos situados em extremidades opostas de um link. Estes IEs são gerados todas as vezes que ocorre alguma mudança na saída dos algoritmos de seleção, e aguardam até que pacotes de dados com destino à outra extremidade do link entrem na fila de transmissão, quando são então adicionados ao *frame* destes pacotes e enviados. Também são enviados, periodicamente, *beacons* de sincronização, que são *beacons* enviados simultaneamente através de todas as interfaces disponíveis, especificamente com o intuito de manter os algoritmos de seleção atualizados. Este processo evita que algum *link* seja esquecido definitivamente após ser desativado uma vez. A recepção de um *beacon* de sincronização força seu receptor a emitir imediatamente um *frame* do tipo *Enhanced Ack*, contendo um IE com a seleção mais atual.

Figura 9 – Algoritmo de seleção PhyMAC - Transmissor



Fonte: Elaboração própria

Adicionalmente, o processo de troca de *beacons* de sincronização tem o objetivo de melhorar a acuracidade do LQE *Triangle*, da forma como foi implementado em PhyMAC. O algoritmo original só computa um resultado quando um pacote é recebido com sucesso. Desta forma, no caso de um link com PRR muito baixa, pode demorar para ser atualizado, fornecendo leituras falsamente elevadas. Em PhyMAC, quando um *beacon* de sincronização é recebido o PRR de todos os *links* é atualizado (inclusive dos links através dos quais o *beacon* não foi recebido corretamente), forçando uma atualização da métrica.

Finalmente, encontra-se ilustrado na [Figura 9](#) o mecanismo de seleção de interface utilizado na extremidade transmissora. Basicamente, nesta extremidade, é mantido em cache o conteúdo do último IE recebido através daquele link. Caso o *frame* a ser enviado não contenha um IE explicitando quais interfaces devem ser utilizadas, a seleção é feita automaticamente, baseando-se nos dados contidos no cache (provenientes da seleção realizada na extremidade receptora).

7 Avaliação experimental

A fim de validar experimentalmente as propostas realizadas nos capítulos 5 e 6 num ambiente real, foi estabelecida uma rede multi-salto composta por sete nodos. Estes nodos foram dispostos em um ambiente residencial a uma distância regular de cerca de quinze metros. Buscou-se dispor os nodos de forma que cada um dos saltos estivesse exposto a um ambiente ligeiramente diferente dos demais, incluindo espaços abertos, fechados, vegetação densa e por fim um ambiente de alta umidade. Vale ressaltar que não existiam nestes ambientes outras fontes notáveis de interferência além de dois roteadores WiFi operando na banda de 2.4 GHz.

É importante também notar que o desempenho dos links de comunicação pode ser afetado significativamente por uma série de parâmetros configuráveis, como a seleção do canal utilizado ou a potência de transmissão, além de fatores externos. Para realização dos experimentos em ambiente real o valor destes parâmetros foi escolhido manualmente, de forma a melhor permitir a visualização dos efeitos do ambiente sobre as diferentes interfaces disponíveis. Mais especificamente, o canal selecionado para cada uma das interfaces foi escolhido de forma a reduzir a intensidade do ruído de fundo (avaliado através de uma varredura realizada pela própria plataforma de testes), sendo o valor escolhido mantido constante para todos os nodos. A potência de transmissão foi reduzida, com o objetivo de permitir que houvesse uma certa porcentagem de falhas na troca de pacotes entre os nodos, possibilitando melhor visualização do comportamento dos algoritmos implementados num ambiente real.

Adicionalmente, durante os testes não haviam mecanismos de roteamento implementados nos nodos, por este motivo foi definida uma topologia linear para a rede de testes. Esta estrutura foi previamente fixada através de parâmetros de configuração, que indicavam para cada nodo qual seria o endereço do vizinho com o qual ele deveria se comunicar. As extremidades desta estrutura não se comunicavam entre si, resultando em seis saltos que puderam ser monitorados para obtenção dos resultados experimentais. Durante os testes cada um dos nodos foi equipado com um cartão SD, através do qual arquivos de log puderam ser posteriormente recuperados, permitindo a análise do desempenho dos links e dos mecanismos de seleção de interface.

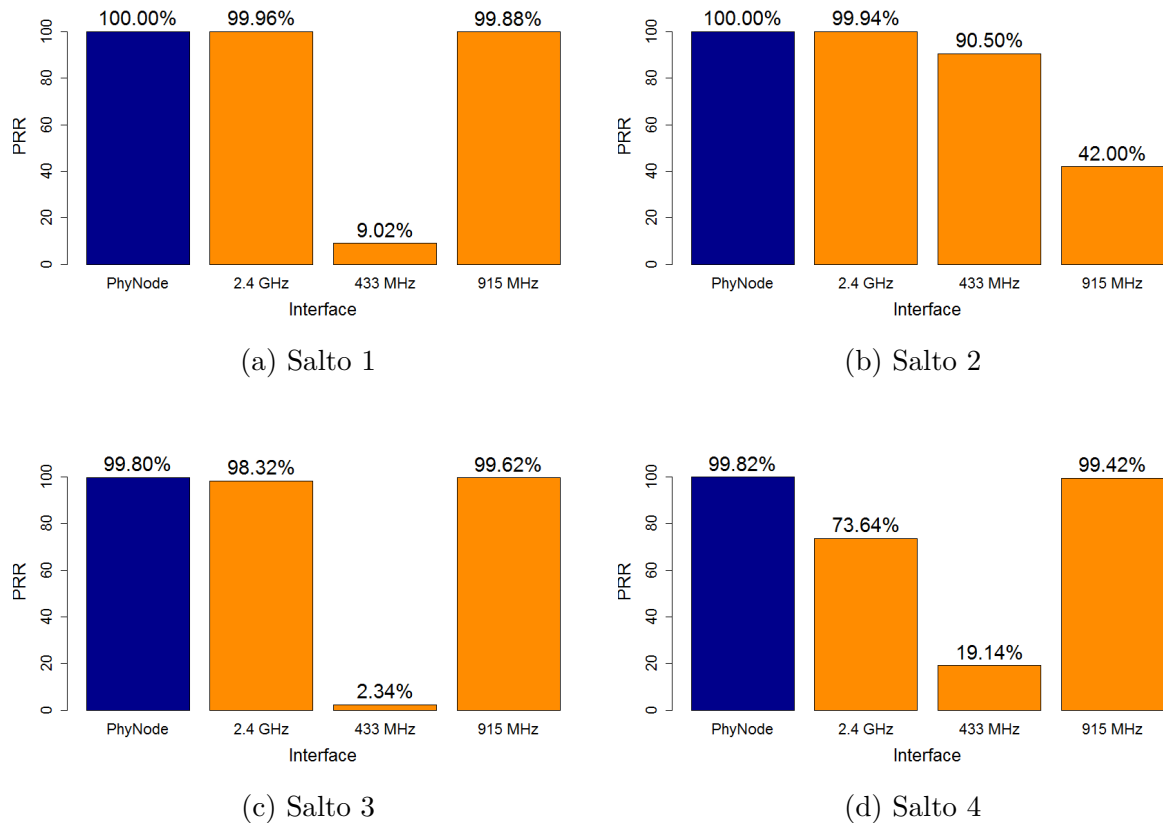
Como será descrito nas seções seguintes, os testes realizados buscaram validar em duas etapas as soluções propostas. Inicialmente foi avaliado o desempenho dos enlaces providos por protótipos baseados na arquitetura PhyNode. Já na segunda etapa foi avaliado o desempenho da solução composta por nodos baseados na arquitetura PhyNode operando em conjunto com os algoritmos de seleção de interfaces propostos em PhyMAC.

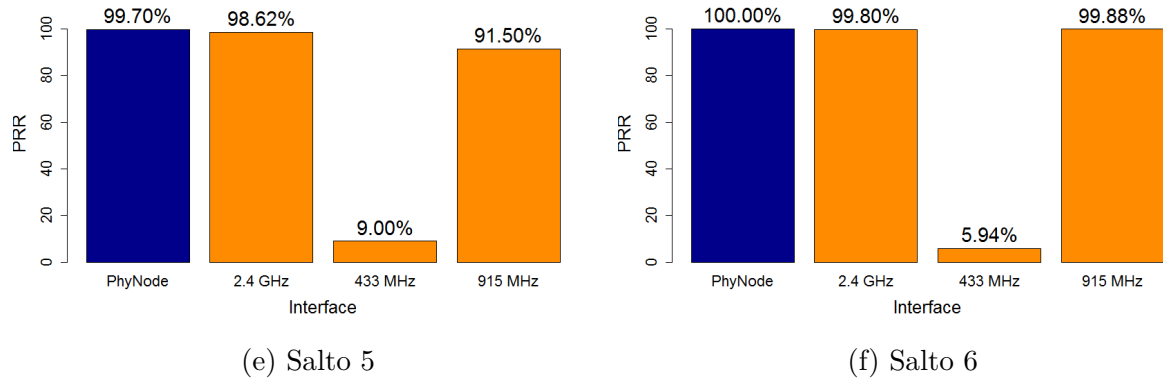
7.1 PhyNode

Inicialmente foram realizados testes destinados a validar experimentalmente a arquitetura PhyNode. Estes testes tiveram como objetivo avaliar o desempenho dos enlaces de rádio providos pelo sistema de comunicação, baseado no conceito de diversidade de interfaces, que foi proposto por esta arquitetura. Estes testes consistiram na transmissão de um total de 5000 *beacons*, separados por intervalos de tempo com duração fixa de 100ms. Cada uma das transmissões foi realizada, simultaneamente, através das três interfaces disponíveis. A escolha da quantidade de pacotes e intervalo de envio também se deu experimentalmente e teve como objetivo fornecer um espaço amostral suficientemente amplo para posterior análise dos dados, minimizando o tempo gasto com cada rodada de testes.

Os resultados encontram-se ilustrados na Figura 10 e na Figura 11. Os gráficos presentes na Figura 10 representam a PRR obtida a partir de cada uma das interfaces após a conclusão do teste. Há uma coluna adicional (*PhyNode*), a qual representa os valores obtidos através de um contador de PRR implementado após a camada MAC, e expressa a PRR que seria efetivamente obtida por aplicações em execução nas camadas superiores da pilha de protocolos (uma vez que pacotes redundantes, recebidos por mais

Figura 10 – PRR (Transmissão através de todas as interfaces)



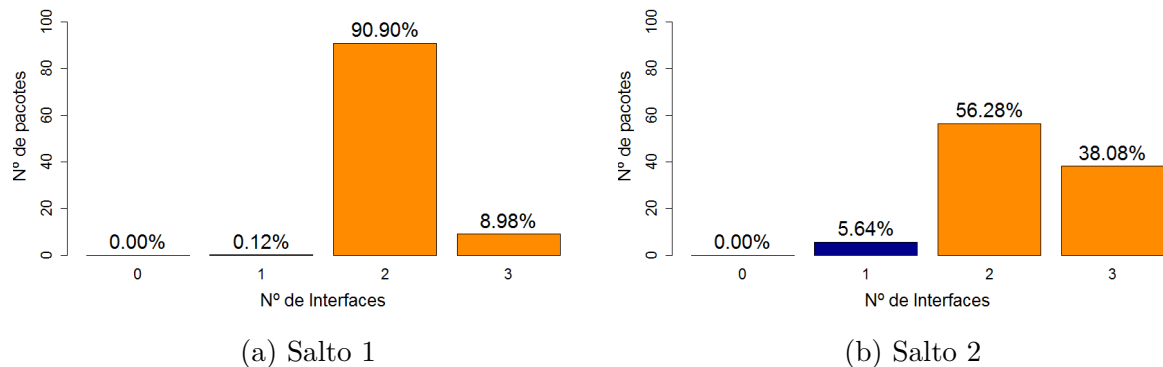


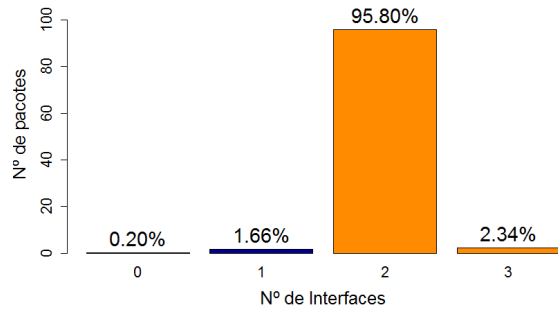
Fonte: Elaboração própria

de uma interface, são descartados diretamente pela camada MAC). Pode-se observar que o comportamento dos links tende a variar de acordo com o ambiente onde são colocados, no entanto a PRR obtida por PhyNode é constantemente maior do que a obtida através de qualquer uma das interfaces isoladamente, comprovando que a diversidade de interfaces, da forma como foi implementada, tem o potencial para elevar a qualidade dos links de comunicação entre nodos de uma rede de sensores sem fios.

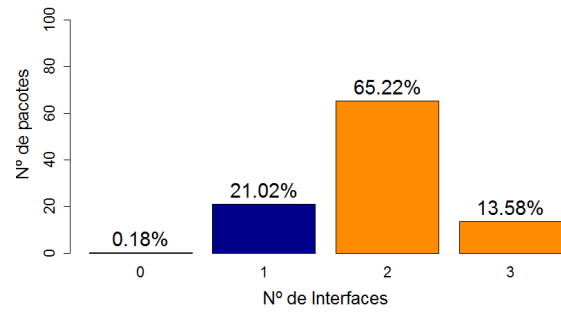
Adicionalmente, os gráficos presentes na [Figura 11](#) representam o nível de redundância decorrente do uso simultâneo de todas as interfaces. Cada uma das colunas representa o número de interfaces através das quais determinado pacote foi recebido. Por exemplo, um pacote totalmente perdido contribuiria para o aumento do valor percentual da coluna "0", já um pacote recebido simultaneamente pelas três interfaces iria contribuir para o aumento do percentual representado pela coluna "3". Durante a realização destes testes, em condições ideais, os gráficos deveriam apresentar 100% de recepção na coluna "3", porém como houveram perdas de pacotes a distribuição apresentada varia a cada salto.

Figura 11 – Distribuição da recepção dos pacotes (Sem otimização)

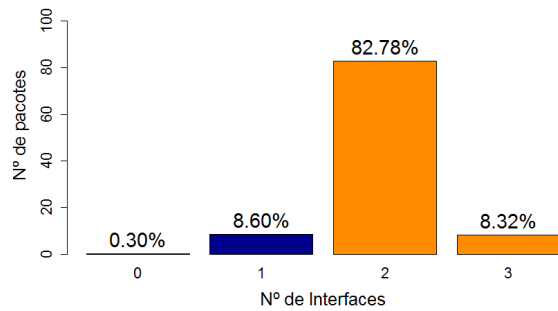




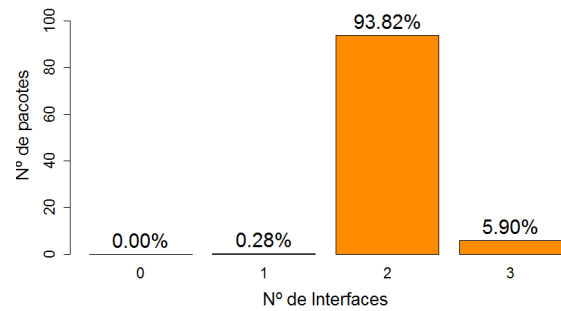
(c) Salto 3



(d) Salto 4



(e) Salto 5



(f) Salto 6

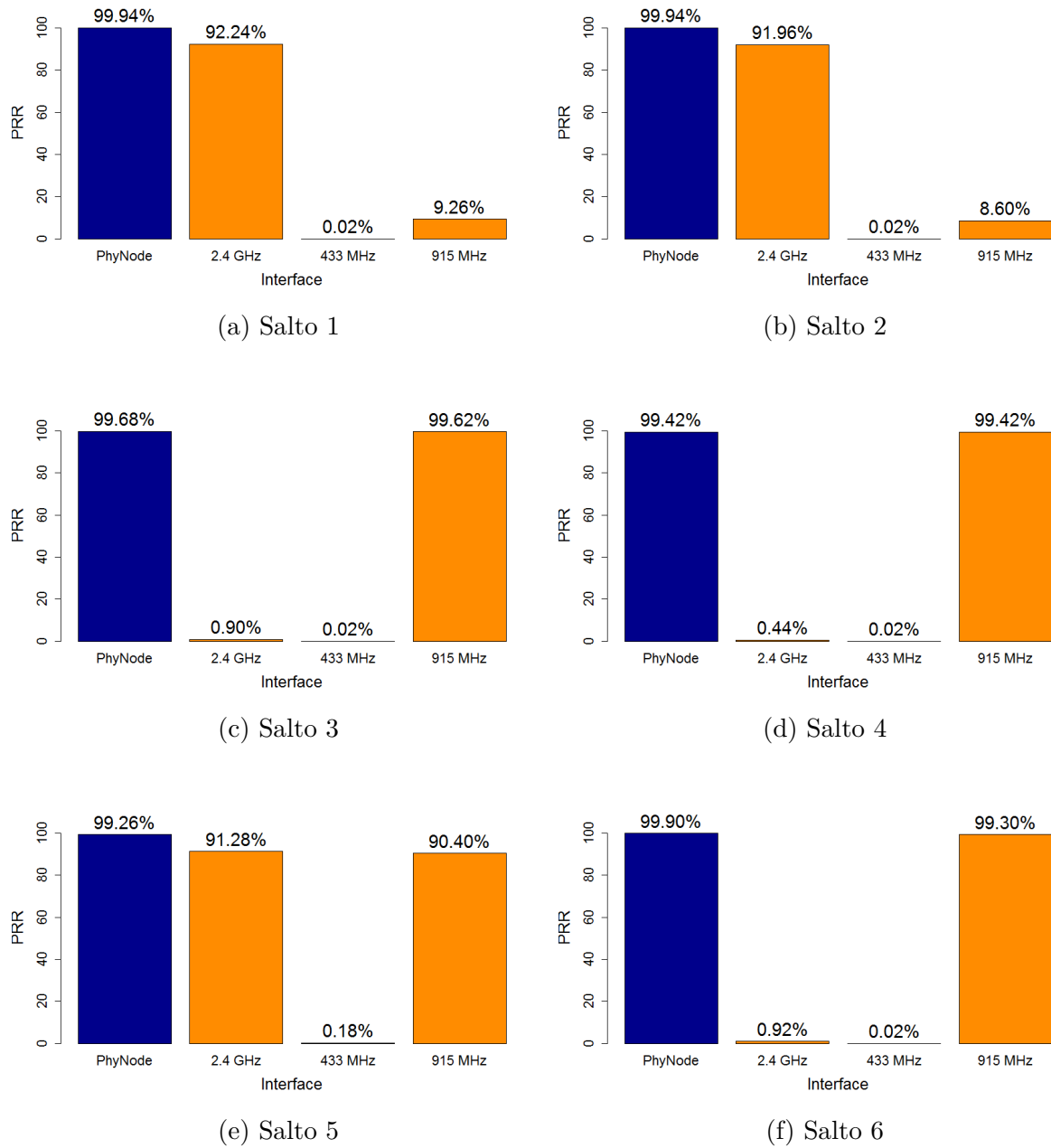
Fonte: Elaboração própria

7.2 PhyMAC

Os testes iniciais demonstraram que a arquitetura introduzida por PhyNode é capaz de prover enlaces robustos e confiáveis, através da utilização simultânea de múltiplas interfaces de comunicação. No entanto a eficiência energética com a qual a plataforma opera fica comprometida pela grande quantidade de pacotes redundantes que podem ser transmitidos nos casos em que mais de uma interface apresenta alta taxa de recepção (PRR). Os algoritmos de controle propostos em PhyMac são destinados à seleção dinâmica das interfaces de transmissão, com o objetivo de mitigar o *overhead* energético causado por este cenário.

A fim de avaliar o desempenho destes algoritmos foram realizados novos testes baseados nos mesmos parâmetros utilizados anteriormente, porém utilizando PhyMAC para controlar os processos de transmissão e seleção de interfaces. Os resultados encontram-se ilustrados na Figura 12, na Figura 13 e na Figura 14. Nas Figuras 12 e 13 encontram-se gráficos equivalentes aos obtidos a partir dos testes realizados anteriormente, no entanto os resultados são bastante diferentes. Pode-se observar na Figura 12 que os valores de PRR obtidos por *PhyNode* continuam consistentemente altos, porém o PRR médio apresentado pelas demais interfaces foi reduzido, indicando que houve redução da quantidade de pacotes redundantes transmitidos durante os testes.

Figura 12 – PRR (Triangle)

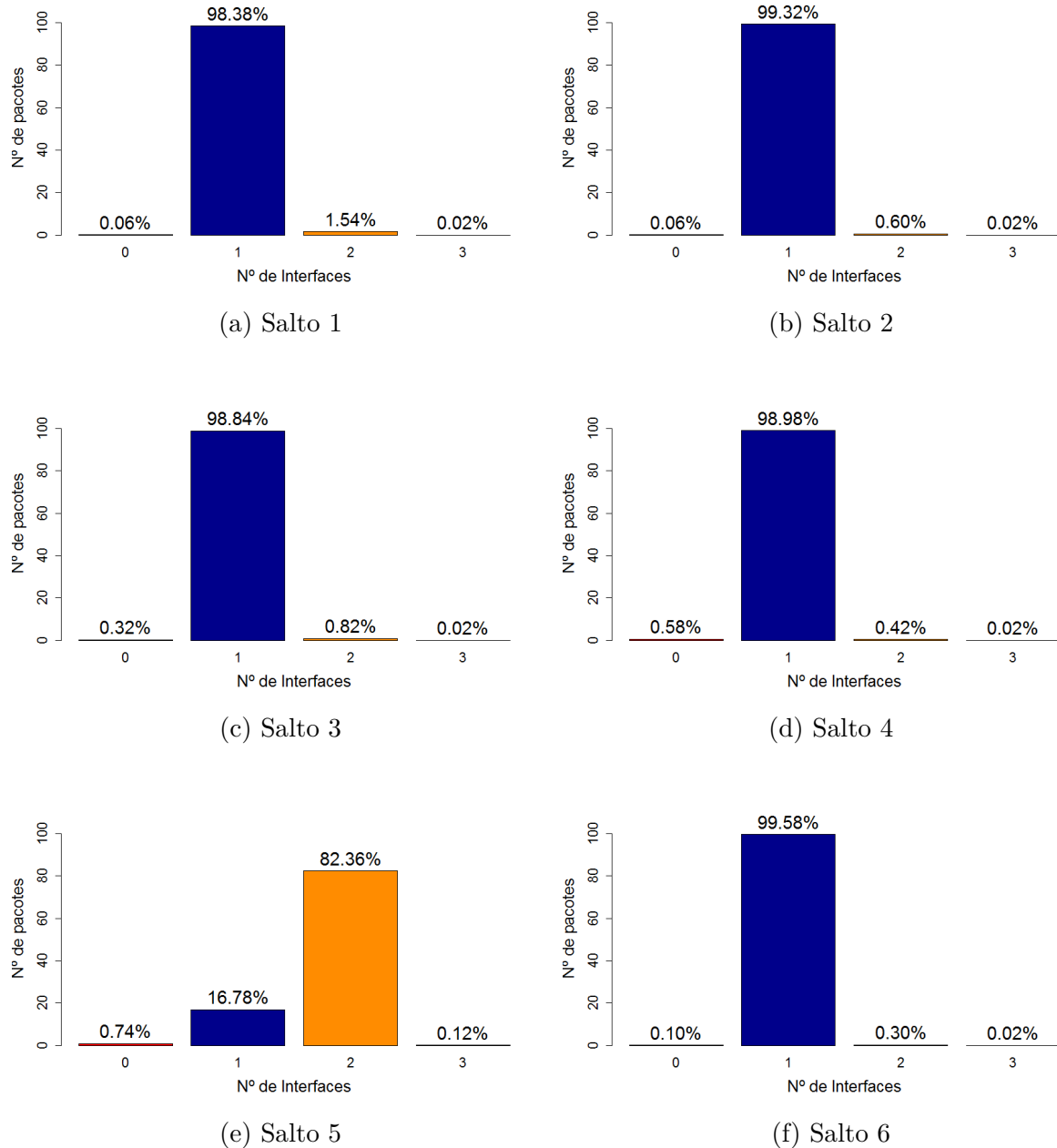


Fonte: Elaboração própria

Esta análise é confirmada pelos gráficos apresentados na [Figura 13](#), que apresentam percentuais consistentemente altos para entregas bem sucedidas através de transmissões realizadas por uma única interface. Há uma exceção no caso da [Figura 13e](#), que apresenta um índice maior de transmissões realizadas simultaneamente através de duas interfaces. Isto se deve ao fato de que todos os links disponíveis no salto 5, durante este teste, apresentaram menor qualidade (como evidenciado pela [Figura 11e](#)), sendo necessário a ativação de múltiplas interfaces de transmissão. No entanto este comportamento se

demonstra correto, uma vez que o PRR obtido por *PhyNode* na Figura 12e é próximo do ideal, enquanto o PRR de cada uma interfaces utilizadas para transmissão é, isoladamente, inferior.

Figura 13 – Distribuição da recepção dos pacotes (Triangle)

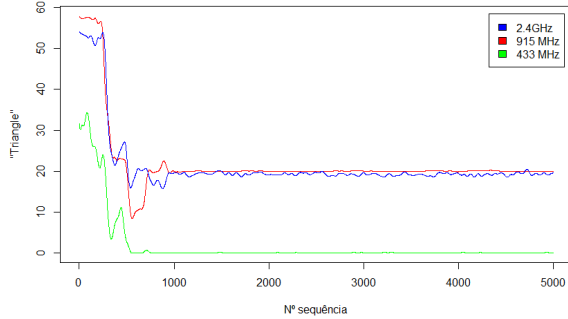


Fonte: Elaboração própria

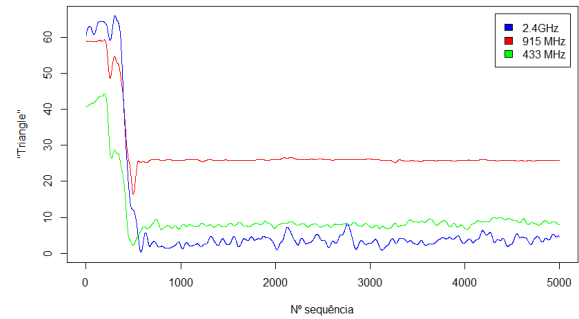
Adicionalmente, é possível observar através dos gráficos presentes na Figura 14 os valores computados pelo LQE *Triangle* ao longo da execução dos testes. As variações mais bruscas presentes nos valores iniciais se devem à movimentação física dos nodos, no início dos testes, para que pudessem ser reposicionados. Pode-se notar que os valores se tornam

relativamente estáveis após o posicionamento final (por volta do milésimo pacote).

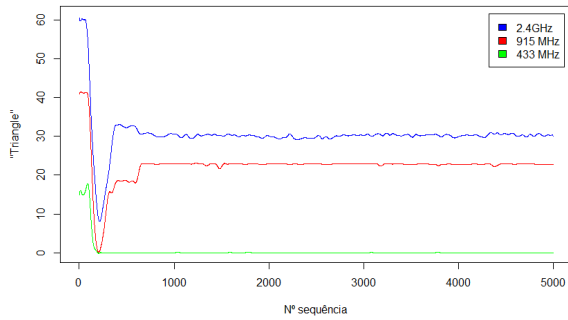
Figura 14 – Métrica *Triangle*



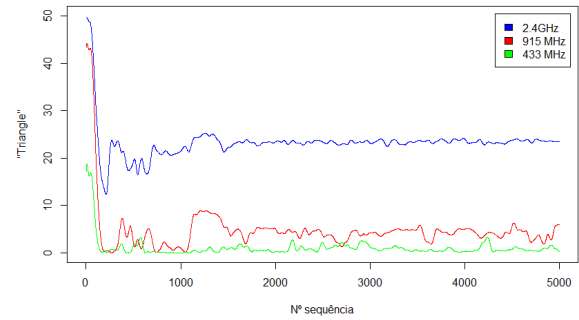
(a) Salto 1



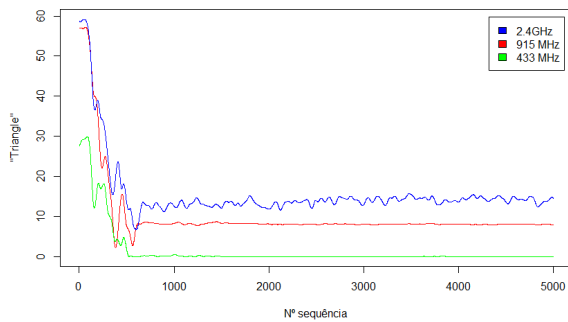
(b) Salto 2



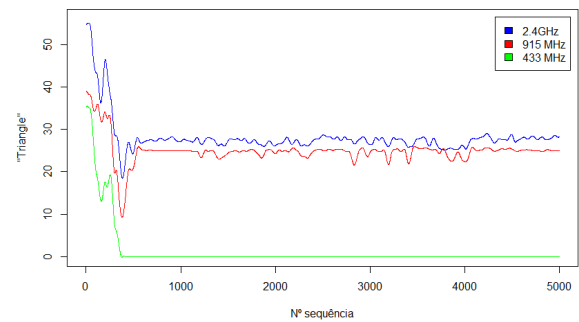
(c) Salto 3



(d) Salto 4



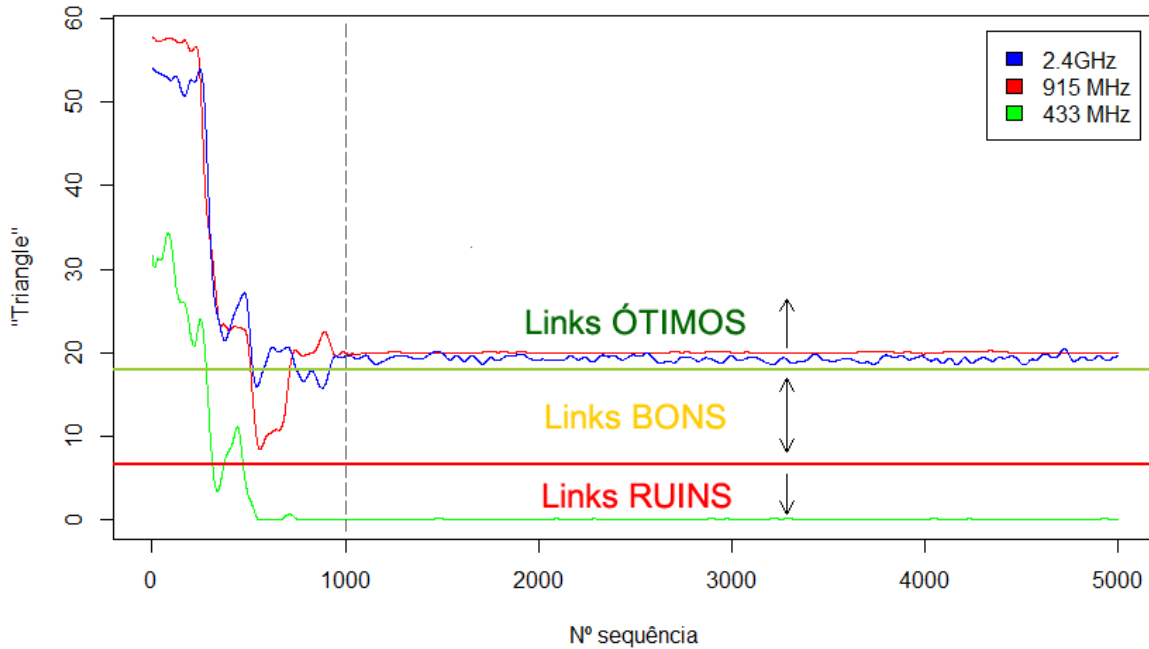
(e) Salto 5



(f) Salto 6

Fonte: Elaboração própria

Também é possível observar que os resultados apresentam variabilidade considerável entre os diferentes saltos, no entanto links de boa qualidade obtêm estimativas de qualidade com valores próximos à 20, enquanto os links de baixa qualidade obtêm consistentemente valores menores que 10. Estes resultados validam a possibilidade de utilizar fatores de calibração para filtragem dos resultados gerados por *Triangle*. Processo este que é demonstrado através do gráfico presente na [Figura 15](#), onde as linhas verde e vermelha

Figura 15 – Métrica *Triangle* - Fatores de calibração

Fonte: Elaboração própria

representam dois parâmetros de calibração, dividindo o gráfico em três regiões, cada qual contendo links de uma categoria (*RUINS*, *BONS* ou *ÓTIMOS*).

Após avaliação dos resultados experimentais conclui-se que a diversidade de interfaces da forma como foi implementada em PhyNode possui a capacidade de prover links de alta qualidade, atingindo durante os testes resultados próximos do ideal. No entanto o consumo de energia originado pela utilização simultânea de múltiplas interfaces é bastante elevado, podendo ser inadmissível na maioria dos projetos de redes de sensores sem fios. Adicionalmente pode-se comprovar que a utilização simultânea de múltiplas interfaces de comunicação tende a resultar em grandes quantidades de transmissões redundantes que, se evitadas, poderiam representar reduções expressivas no consumo energético do conjunto de radiotransmissores utilizados.

Conclui-se ainda que PhyMAC é capaz de reduzir a quantidade de pacotes redundantes transmitidos na rede, sem causar redução significativa da qualidade dos links disponibilizados por PhyNode. Sendo assim é possível afirmar que o conjunto de propostas a partir das quais foram elaborados PhyNode e PhyMAC consiste numa solução válida para a obtenção de links de comunicação de melhor qualidade, sem grandes *overheads* energéticos.

8 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo explorar alternativas para lidar com a instabilidade dos links de comunicação sem fios de baixa potência, frequentemente utilizados nas redes de sensores sem fios e outros sistemas de baixa potência derivados da mesma arquitetura. As propostas realizadas basearam-se na utilização de técnicas orientadas à diversidade de interfaces: um paradigma de implementação que visa explorar diferentes características físicas dos meios de transmissão, com o objetivo de permitir o estabelecimento de múltiplos links de comunicação independentes, potencialmente provendo conexões mais robustas e estáveis.

Inicialmente foi proposta uma arquitetura de hardware capaz de implementar a diversidade de interfaces através do espalhamento espectral fornecido por um conjunto de múltiplas interfaces de rádio, operando em bandas de frequência distintas. PhyNode, a arquitetura proposta, demonstrou-se experimentalmente capaz de prover links de comunicação de altíssima qualidade, no entanto a utilização simultânea de múltiplos transmissores provou-se pouco eficiente em termos de consumo energético, uma vez que grande parte das transmissões realizadas foi redundante.

Em seguida foi proposta uma extensão à camada MAC do padrão IEEE 802.15.4, com o objetivo de fornecer aos protocolos e aplicações operando em camadas superiores o suporte necessário para operação transparente na arquitetura PhyNode, abstraindo as funcionalidades relacionadas à diversidade de interfaces. A extensão proposta, PhyMAC, conta ainda com algoritmos de controle capazes de otimizar o consumo dos links de comunicação estabelecidos por PhyNode, visando reduzir o volume de transmissões redundantes realizadas.

Finalmente, os protótipos desenvolvidos foram submetidos a testes em ambientes reais, revelando que a utilização do conjunto de soluções propostas em PhyNode e PhyMAC pode consistir numa alternativa válida para obtenção de links de comunicação mais robustos, sem grande *overhead* energético.

É necessário ainda considerar que a complexidade e o custo associados à produção de um nodo baseado na arquitetura PhyNode podem ser significativamente superiores àqueles associados com a produção de um nodo convencional, que não utilize técnicas de diversidade de interfaces. No entanto PhyNode, se utilizado em conjunto com PhyMAC, pode permitir a implantação de redes menos densas e mais robustas podendo, em alguns casos, ser uma solução mais vantajosa.

Adicionalmente, em teoria, o conjunto de *hardware* e *software* que compõe os nodos baseados em PhyNode e PhyMAC provê suporte à utilização de diversos protocolos de alto

nível como ZigBee, 6LoWPAN e outros implementados a partir do padrão IEEE 802.15.4, abrindo caminho para a implementação de diversas outras camadas de software destinadas à interoperabilidade de dispositivos. Pode-se considerar a possibilidade de implementações capazes de integrar-se simultaneamente a redes baseadas em diferentes tecnologias e/ou protocolos, ou ainda de utilizar o conjunto PhyNode e PhyMAC para implementação de redes heterogêneas, formadas por diferentes tipos de nodos, cada qual operando através de uma tecnologia.

Referências

- AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002. ISSN 13891286. Citado na página [12](#).
- ANASTASI, G. et al. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, v. 7, n. 3, p. 537–568, may 2009. ISSN 15708705. Citado 3 vezes nas páginas [12](#), [14](#) e [15](#).
- BACCOUR, N. et al. RadiaLE: A framework for designing and assessing link quality estimators in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, v. 9, n. 7, p. 1165–1185, 2011. ISSN 15708705. Citado na página [22](#).
- BACCOUR, N. et al. A comparative simulation study of link quality estimators in wireless sensor networks. *Proceedings - IEEE Computer Society's Annual International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems, MASCOTS*, p. 301–310, 2009. Citado na página [23](#).
- BACCOUR, N. et al. Radio link quality estimation in wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, v. 8, n. 4, p. 1–33, 2012. ISSN 15504859. Citado 9 vezes nas páginas [18](#), [19](#), [20](#), [21](#), [22](#), [24](#), [25](#), [26](#) e [43](#).
- BOANO, C. et al. Exploiting the LQI variance for rapid channel quality assessment. *2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, p. 369–370, 2009. Citado na página [25](#).
- BOANO, C. A. The Triangle Metric: Fast Link Quality Estimation for Mobile Wireless Sensor Networks. *2010 Proceedings of 19th International Conference on Computer Communications and Networks*, p. 1–7, 2010. Citado 2 vezes nas páginas [21](#) e [46](#).
- CERPA, A. et al. Statistical model of lossy links in wireless sensor networks. *2005 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2005*, v. 2005, p. 81–88, 2005. Citado na página [26](#).
- CORREL, J. T. Igloo white. *Journal of The Airforce Association*, p. 56–61, 2004. Citado na página [9](#).
- De Couto, D. S. J. et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless Networks*, v. 11, n. 4, p. 419–434, jul 2005. ISSN 10220038. Citado na página [19](#).
- FONSECA, R. et al. Four-Bit Wireless Link Estimation. *HotNets*, p. 0–5, 2007. Citado 2 vezes nas páginas [21](#) e [22](#).
- GNAWALI, O. et al. Collection tree protocol. *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, ACM, p. 1–14, 2009. Citado 2 vezes nas páginas [10](#) e [20](#).
- GOLDSMITH, A. *Wireless communications*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005. 644 p. ISBN 0511133154. Citado na página [18](#).

GUMMESON, J. et al. An adaptive link layer for heterogeneous multi-radio mobile sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 28, n. 7, p. 1094–1104, 2010. Citado na página 28.

HARROP, P.; DAS, R. *Wireless Sensor Networks (WSN) 2014-2024: Forecasts, Technologies, Players*. [S.l.], 2014. 1–282 p. Citado na página 10.

HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. vol.1, p. 10, 2000. Citado na página 9.

IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). *IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003)*, p. 1–320, Sept 2006. Citado na página 33.

IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirement Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). *IEEE Std 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)*, p. 1–203, 2007. Citado na página 33.

IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). *IEEE Std 802.15.4-2003*, p. 1–670, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 32.

IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Amendment 2: Alternative Physical Layer Extension to support one or more of the Chinese 314-316 MHz, 430-434 MHz, and 779-787 MHz bands. *IEEE Std 802.15.4c-2009 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)*, p. c1–21, April 2009. Citado na página 33.

IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Amendment 3: Alternative Physical Layer Extension to support the Japanese 950 MHz bands. *IEEE Std 802.15.4d-2009 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)*, p. c1–27, April 2009. Citado na página 33.

IEEE Standard for Local and metropolitan area networks– Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 2: Active Radio Frequency Identification (RFID) System Physical Layer (PHY). *IEEE Std 802.15.4f-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011)*, p. 1–72, April 2012. Citado na página 35.

IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, p. 1–314, Sept 2011. Citado na página 33.

IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer. *IEEE Std 802.15.4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011)*, p. 1–225, April 2012. Citado na página 35.

IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks. *IEEE Std 802.15.4g-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011)*, p. 1–252, April 2012. Citado na página 35.

IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)*, p. 1–709, April 2016. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 45.

IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)*, p. 1–709, April 2016. Citado na página 38.

IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks –Amendment 2: Ultra-Low Power Physical Layer. *IEEE Std 802.15.4q-2016 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2015 as amended by IEEE Std 802.15.4n-2016)*, p. 1–52, April 2016. Citado na página 35.

International Electrotechnical Commission. *Internet of Things: Wireless Sensor Networks*. Genova: [s.n.], 2014. 1–78 p. ISBN 978-2-8322-1834-1. Citado na página 10.

JURDAK, R. et al. Opal: A multiradio platform for high throughput wireless sensor networks. *Embedded Systems Letters, IEEE*, v. 3, n. 4, p. 121–124, 2011. ISSN 1943-0663. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.

KAHN, J. M.; KATZ, R. H.; PISTER, K. S. J. Emerging challenges: Mobile networking for “Smart Dust”. *Communications and Networks, Journal of*, v. 2, n. 3, p. 188–196, 2000. ISSN 1229-2370. Citado na página 9.

KIM, A. N. et al. When hart goes wireless: Understanding and implementing the wirelesshart standard. In: *2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 899–907. ISSN 1946-0740. Citado na página 32.

KIM, K.-H.; SHIN, K. G. On accurate measurement of link quality in multi-hop wireless mesh networks. *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking MobiCom 06*, p. 38, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

Kim M., N. B. Mobile network estimation. *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM*, p. 298–309, 2001. Citado na página 22.

KUSY, B. et al. Radio diversity for reliable communication in WSNs. *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, v. 10, n. 2, p. 270–281, 2011. ISSN 15504859. Citado 7 vezes nas páginas 10, 18, 23, 27, 28, 29 e 42.

LAI, D. L. D. et al. Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks. *GLOBECOM '03. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE Cat. No.03CH37489)*, v. 1, p. 446–452, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.

- LEVIS, P. et al. TinyOS: An operating system for sensor networks. *Ambient Intelligence*, p. 115–148, 2005. Citado na página 28.
- LI, J.; MOHAPATRA, P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, v. 3, n. 3, p. 233–254, 2007. ISSN 15741192. Citado na página 17.
- LIN, S. et al. Towards Stable Network Performance in Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the 2009 30th IEEE Real-Time Systems Symposium*, IEEE, p. 227–237, dec 2009. ISSN 1052-8725. Citado na página 23.
- LYMBEROPOULOS, D. et al. Towards Energy Efficient Design of Multi-radio Platforms for Wireless Sensor Networks. *Information Processing in Sensor Networks, 2008. IPSN '08. International Conference on*, p. 257–268, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 28, 30 e 42.
- MONTENEGRO, G. et al. *Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15. 4 networks*. [S.l.], 2007. Citado na página 32.
- Peng Jiang et al. Research on Wireless Sensor Networks Routing Protocol for Wetland Water Environment Monitoring. *First International Conference on Innovative Computing, Information and Control - Volume I (ICICIC'06)*, IEEE, v. 3, p. 251–254, 2006. Citado na página 20.
- PERING, T. et al. *CoolSpots: reducing the power consumption of wireless mobile devices with multiple radio interfaces*. Uppsala, Sweden: ACM, 2006. 220–232 p. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- PORCINO, D.; HIRT, W. Ultra-wideband radio technology: potential and challenges ahead. *IEEE Communications Magazine*, v. 41, n. 7, p. 66–74, July 2003. ISSN 0163-6804. Citado na página 34.
- POTTIE, G. J.; KAISER, W. J. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, v. 43, n. 5, p. 51–58, 2000. ISSN 00010782. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 14.
- RAWAT, P. et al. Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. *The Journal of Supercomputing*, v. 68, n. 1, p. 1–48, 2014. ISSN 1573-0484. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 12 e 35.
- SANG, L.; ARORA, A.; ZHANG, H. On link asymmetry and one-way estimation in wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, v. 6, n. 2, p. 1–25, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- SPECIFICATION, Z. v1. 0: Zigbee specification (2005). *San Ramon, CA, USA: ZigBee Alliance*, 2005. Citado na página 32.
- SRINIVASAN, K. et al. Understanding the causes of packet delivery success and failure in dense wireless sensor networks. *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems - SenSys '06*, p. 419, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 25.
- SRINIVASAN, K. et al. An empirical study of low-power wireless. *ACM Transactions on Sensor Networks*, v. 6, n. 2, p. 1–49, 2010. Citado na página 25.

- SRINIVASAN, K. et al. The β -factor. *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems - SenSys '08*, ACM Press, New York, New York, USA, p. 29, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 42.
- Texas Instruments. *BQ2407x 1.5-A USB-Friendly Li-Ion Battery Charger and Power-Path Management IC*. Dallas, Texas: Texas Instruments, 2014. Citado na página 40.
- WANG, Y.; MARTONOSI, M.; PEH, L. S. Predicting link quality using supervised learning in wireless sensor networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing ...*, v. 11, n. 3, p. 71–83, 2007. ISSN 15591662. Citado na página 21.
- WANT, R.; DUSTDAR, S. Activating the Internet of Things [Guest editors' introduction]. *Computer*, v. 48, n. 9, p. 16–20, sep 2015. ISSN 0018-9162. Citado na página 10.
- WARNEKE, B. et al. Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer. *Computer*, v. 34, n. 1, p. 44–51, 2001. ISSN 00189162. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 29.
- WOO, A.; CULLER, D. Evaluation of Efficient Link Reliability Estimators for Low-Power Wireless Networks. p. 1–20, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- Yanjun Li et al. A reliable routing protocol design for wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005.*, IEEE, p. 58–61, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.