

Capítulo

4

Redes Corporais Sem Fio e Suas Aplicações em Saúde

Vinicius C. Ferreira, Egberto Caballero, Robson Lima, Helga Balbi, Flávio L. Seixas, Célio Albuquerque e Débora C. Muchaluat-Saade

Resumo

Avanços na eletrônica permitiram o desenvolvimento de sensores biomédicos miniaturizados e inteligentes, que podem ser utilizados para monitorar o funcionamento do corpo humano. O uso da comunicação sem fio se mostrou uma alternativa adequada, que proporciona menor incômodo aos pacientes e maior custo-benefício. A fim de explorar plenamente os benefícios das tecnologias sem fio na telemedicina, um novo tipo de rede sem fio emergiu: as redes corporais sem fio (Wireless Body Area Networks) - WBANs. No entanto, desafios técnicos e sociais devem ser tratados para permitir sua adoção prática. Alguns desses desafios já são conhecidos de outros cenários, como os requisitos de operação para uma rede sem fio, a eficiência energética, os poucos recursos computacionais e a composição heterogênea da rede. Porém, alguns fatores como o uso do corpo humano como meio de propagação, os efeitos da radiação no tecido humano e variações na movimentação do corpo fazem das redes corporais sem fio um novo paradigma de redes de comunicação sem fio. O principal objetivo deste capítulo é a discussão sobre os principais conceitos, desafios e perspectivas para redes corporais sem fio, área de grande oportunidade para pesquisa e desenvolvimento.

Abstract

Advances in electronics have enabled the development of tiny yet and intelligent biomedical sensors to monitor the human body. The use of wireless technology has proved to be adequate for communication, providing less inconvenience to patients and being more cost-effective. In order to fully exploit the benefits of wireless technologies in telemedicine, a new type of wireless network has emerged: Wireless Body Area Networks (WBANs). However, technical and social challenges must be addressed to enable its practical adoption. Some of these challenges are widely known in other contexts, such as

wireless networks operating requirements, energy efficiency, low computational resources and a heterogeneous network composition. However, some factors such as the use of the human body as a propagation media, the effects of radiation on human tissue and variations in body movement make WBANs a new paradigm for wireless communication networks. The main goal of this chapter is to discuss the main concepts, challenges and perspectives for WBANs, a field of great opportunity for research and development.

4.1. Introdução

Redes corporais sem fio, ou WBANs (*Wireless Body Area Networks*), são redes que comumente englobam a utilização de uma coleção de dispositivos que possuem como características principais o baixo consumo energético, pequeno tamanho e peso e capacidade de comunicação sem fio nas proximidades do corpo. Tais dispositivos podem ser implantados sobre, dentro ou nos arredores do corpo humano. Estes dispositivos comumente são sensores e atuadores que podem monitorar funções do corpo e características do ambiente ao seu redor.

Uma das principais motivações para o surgimento de WBANs é o desenvolvimento de aplicações voltadas para a saúde. Tendo em vista o aumento da população idosa mundial em conjunto com o aumento de gastos relacionados à saúde e a necessidade de tratá-la de forma preventiva, o desenvolvimento de novas tecnologias escaláveis capazes de prover monitoramento de funções do corpo humano a baixo custo se torna interessante. Porém, a tecnologia não se restringe somente a aplicações médicas. Além de aplicações médicas, outros campos como entretenimento, esportes, jogos, aplicações militares, etc. podem se beneficiar desta nova tecnologia. No entanto, a fim de apoiar essas novas aplicações e suas demandas, os desafios técnicos e sociais devem ser superados. Dentre os desafios técnicos, podemos destacar o desenvolvimento de um sistema flexível de acordo com a demanda da aplicação em termos de atraso, vazão, tempo de vida da rede e consumo de energia. Dentre os desafios sociais, facilidade de uso, segurança e privacidade de dados, interoperabilidade, custo, segurança física e bem-estar são preocupações importantes.

As principais questões envolvidas na criação de uma WBAN são o impacto do dispositivo sem fio no corpo humano, o tempo de vida da bateria do dispositivo e a coexistência com outras tecnologias sem fio. A presença do corpo humano afeta a propagação do sinal, criando um canal de comunicação específico que deve ser considerado no desenvolvimento dos protocolos de comunicação. Tendo em vista que WBANs são comumente implementadas na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2.4GHz, a utilização concorrente do canal por outras tecnologias de comunicação sem fio também deve ser considerada para que não haja falha devido a colisões e ruído. Para o prolongamento da vida útil da bateria e para evitar o aquecimento do tecido humano, mecanismos de economia energética devem ser implementados.

Estes sensores e atuadores são capazes de coletar amostras, monitorar, processar e comunicar diferentes sinais vitais e parâmetros fisiológicos ao médico responsável, provendo informações em tempo real sem ocasionar desconforto ao usuário. Com o uso da informação coletada em um grande período de tempo, o conhecimento sobre o estado de uma pessoa torna-se mais amplo.

Alguns padrões que são considerados para a implementação de WBANs são o IEEE 802.15.4 [IEEE Std 802.15.4 2006a], o IEEE 802.15.6 [IEEE Std 802.15.6 2012] e o *Bluetooth Low Energy* [SIG 2010]. O padrão IEEE 802.15.4, publicado em 2006, especifica as camadas física e de controle de acesso ao meio para comunicações sem fio de curto alcance com baixo consumo energético, baixo custo e baixas taxas de transmissão. O *Bluetooth Low Energy* (BTLE), publicado em 2010, é uma versão de baixo consumo energético do *Bluetooth* original, com o objetivo de operar em dispositivos alimentados por pequenas baterias, como sensores.

O padrão mais recente é o IEEE 802.15.6, publicado em 2012, que foi especificamente desenvolvido para comunicação sem fio dentro, sobre ou nos arredores do corpo humano. Suas características principais são baixo consumo de energia, alta confiabilidade, e alcance na área ao redor do corpo humano suportando diferentes taxas de transmissão que são destinadas a diferentes tipos de aplicações.

É previsto que redes WBAN interajam com outras tecnologias de comunicação, como *ZigBee*, redes de sensores, *Bluetooth*, redes Wi-Fi, redes celulares e sistemas de vigilância. Isto abre campo para a criação de novas aplicações, serviços e dispositivos que trarão maior qualidade de vida. Essas aplicações devem seguir o padrão ISO/IEEE 11073 [IEEE Std 11073-00103 2012]. Este padrão define normas para aplicações de Dispositivos Pessoais de Saúde (DPS), isto é, dispositivos que são utilizados pelos próprios usuários em suas casas, como por exemplo, termômetros, balanças e bombas de insulinas. Também nessa família de normas, é especificado um padrão de comunicação entre DPS e dispositivos gerenciadores, como, *smartphones*, *desktops* e *notebooks*.

Este capítulo aborda os principais conceitos, desafios e perspectivas para WBANs, tema que ainda carece de pesquisa e desenvolvimento. O restante deste texto é organizado da seguinte maneira. A Seção 4.2 apresenta uma visão geral de WBANs, tipos de sensores e arquitetura de rede. Na Seção 4.3, são descritos os protocolos de comunicação WBAN. A Seção 4.4 discute o padrão IEEE 11073, que estabelece normas para a implementação de dispositivos pessoais de saúde. A Seção 4.5 discute desafios e perspectivas futuras no cenário de pesquisa em WBANs. Finalmente, a Seção 4.6 traz as considerações finais.

4.2. Wireless Body Area Networks

As WBANs consistem de vários dispositivos heterogêneos que se comunicam entre si por meio de uma rede sem fio nos arredores do corpo humano. Esses dispositivos têm potencial para se comunicar com aplicativos em sistemas vestíveis para monitoramento da saúde humana [Rodgers et al. 2015]. Os tipos de dispositivos WBANs são:

1. *Nós sensores sem fio* respondem a estímulos físicos, coletam dados, processam e relatam essas informações usando comunicação sem fio.
2. *Nós atuadores sem fio* agem de acordo com dados recebidos de nós controladores, advindas de comandos externos ou interação do usuário.
3. *Nós controladores* agem como agregadores das informações coletadas pelos nós sensores, assim como enviam comandos aos nós atuadores.

A próxima seção descreve características de dispositivos médicos e seus requisitos de comunicação.

4.2.1. Dispositivos Médicos

Os dispositivos médicos são implementados como sensores ou atuadores, portáteis ou implantáveis, pequenos e flexíveis. Os sensores são capazes de medir sinais biológicos e transmitir dados através de comunicação sem fio para outros nós internos ou externos em uma rede de comunicação [Pantelopoulos and Bourbakis 2010, Latré et al. 2011].

Os principais componentes de um sensor médico são transceptor de rádio com uma antena para comunicação sem fio, microprocessador, memória, sensores bioquímicos ou analógicos (por exemplo, ECG - eletrocardiograma, glicose, temperatura) e uma bateria para alimentação elétrica. Esses nós normalmente usam um sistema operacional com capacidade de processamento limitada, poucos requisitos de memória e baixa sobrecarga do sistema. Um exemplo de sistema operacional usado em alguns sensores é o TinyOS de código aberto [Levis et al. 2005].

Um dispositivo médico pode ser colocado no corpo humano com um pequeno adesivo ou implante, ou pode ser colocado sob a roupa, permitindo atividade ubíqua, medições fisiológicas e ambientais no ambiente natural durante um longo período de tempo. Existem vários tipos de dispositivos médicos fisiológicos:

1. *Comprimidos* que contêm um transceptor sem fio e sensores que podem detectar enzimas, ácidos nucleicos, contrações do músculo intestinal, acidez intestinal, pressão e outros parâmetros, permitem monitoramento de doenças gastrointestinais de maneira não invasiva [Hao and Foster 2008].
2. *Dispositivos vestíveis* são sensores portáteis com um transceptor sem fio montado na superfície do corpo humano, como por exemplo, citam-se os *smart watches* ou mesmo sensores em forma de anel usados no dedo para monitorar a frequência cardíaca.
3. *Dispositivos fisiológicos implantáveis* podem ser implantados no paciente para operar dentro do corpo humano, como por exemplo, sensores de nível de glicose ou atuadores para injeção de insulina.

A Tabela 4.1 fornece uma lista de várias tecnologias de sensoriamento, junto com seus dados medidos correspondentes, que podem ser integradas como parte de um sistema vestível de monitoramento de saúde. A interface de um sensor pode ser uma entrada local e/ou uma rede de comunicação. Para entrada local, sensores multitoque flexíveis foram desenvolvidos e exibidos através de uma variedade de tecnologias, desde dispositivos OLED (*Organic Light Emitting Diodes*) até *displays* eletrônicos. A Figura 4.1 representa alguns desses sensores no corpo humano [Latre et al. 2011] e a Figura 4.2 mostra um sensor de pele flexível e elástico desenvolvido pela Universidade de Illinois [Xu et al. 2014].

Tabela 4.1. Sensores biológicos

Bio-sinal	Tipo do sensor	Dado medido
Eletrocardiograma (ECG)	Eletrodos de pele / tórax	Atividade do coração.
Pressão sanguínea	Monitor baseado em uma bolsa de ar posicionada no braço	Refere-se à força exercida pela circulação de sangue nas paredes dos vasos sanguíneos.
Temperatura do corpo	Sensor de temperatura	Medida da capacidade do corpo de liberar calor.
Taxa de respiração	Sensor piezoelétrico	Número de movimentos indicativos de inspiração e expiração por unidade de tempo.
Saturação de oxigênio	Oxímetro de pulso	Indica a oxigenação do sangue do paciente.
Frequência cardíaca	Resposta elétrica da pele	Frequência do ciclo cardíaco.
Transpiração	Resposta Galvânica da Pele	A condutividade elétrica da pele está associada à atividade das glândulas sudoríparas.
Sons cardíacos	Fonocardiografia	Registro de sons cardíacos.
Glicose no sangue	Medidores de glicose à base de tira	Medição da quantidade de glicose no sangue.
Eletromiograma (EMG)	Eletrodos colocados sobre o músculo	Atividade elétrica dos músculos esqueléticos.
Eletroencefalograma (EEG)	Eletrodos colocados no couro cabeludo	Medição da atividade elétrica cerebral involuntária e outros potenciais cerebrais.
Movimentos Corporais	Acelerômetro	Medição de forças de aceleração no espaço 3D.

4.2.2. Taxonomia e Requisitos

A comunicação das WBANs pode ser classificada em três classes diferentes da seguinte maneira:

- *Classe 1* - Comunicação intra-WBAN: a comunicação entre os dispositivos que compõem a WBAN.
- *Classe 2* - Comunicação entre WBANs: a comunicação entre dispositivos de diferentes WBANs através de seus respectivos dispositivos pessoais.
- *Classe 3* - Comunicação além-WBAN: a comunicação entre o dispositivo pessoal e redes externas (e.g. WiFi, celular.).

A Figura 4.3 mostra essas classes de comunicação em um sistema baseado em componentes. Os dispositivos estão espalhados por todo o corpo humano em uma visualização de topologia de rede centralizada, em que a localização exata de um dispositivo é específica do aplicativo [Latré et al. 2011, Movassaghi et al. 2014]. Os próximos parágrafos concentram-se na Classe 1, que inclui sensores, atuadores e outros dispositivos. Tecnologias aplicadas às Classes 2 e 3 são citadas.

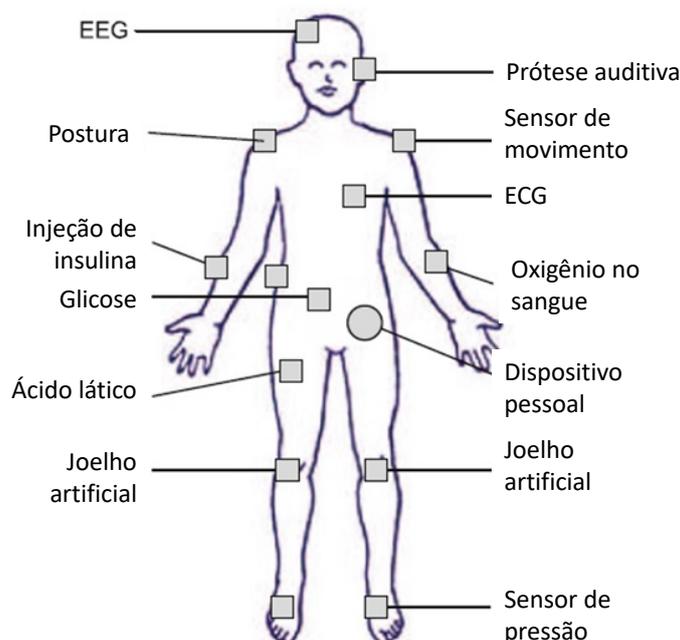


Figura 4.1. Sensores posicionados no corpo humano [Latré et al. 2011].

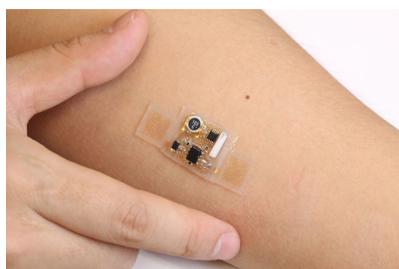


Figura 4.2. Sensor médico desenvolvido pela Universidade de Illinois [Xu et al. 2014]

A maioria das WBANs na literatura utiliza técnicas baseadas em RF (radiofrequência), e são classificadas de acordo com a faixa de operação [Cavallari et al. 2014]. A maioria das tecnologias WBAN opera na banda ISM. Portanto, para evitar problemas de interferência causados pela coexistência com outras redes sem fio, a FCC (*Federal Communications Commission*) forneceu banda de 40 MHz alocada em uma faixa de 2,36 GHz a 2,4 GHz exclusivamente para aplicações médicas, denominada MBAN (*Medical Body Area Network*) [Latré et al. 2011].

Existem outras tecnologias de RFs alocadas para aplicativos WBAN. MICS (*Medical Implant Communications Service*) ou Serviço de Comunicações de Implantes Médicos [Savci et al. 2005] é usado por dispositivos implantáveis e aplicativos que exigem uma taxa de bits acima de 1 Mbps. Pode-se citar, como exemplo, um fluxo de vídeo gerado por uma pequena câmera conectada a uma cápsula ingerível. WMTS (*Wireless Medical Telemetry System*) ou Sistema de Telemetria Médica Sem Fio [Yuce and Ho 2008] fornece uma taxa de bits de cerca de 400 kbps e cobre uma distância máxima de 2 metros.

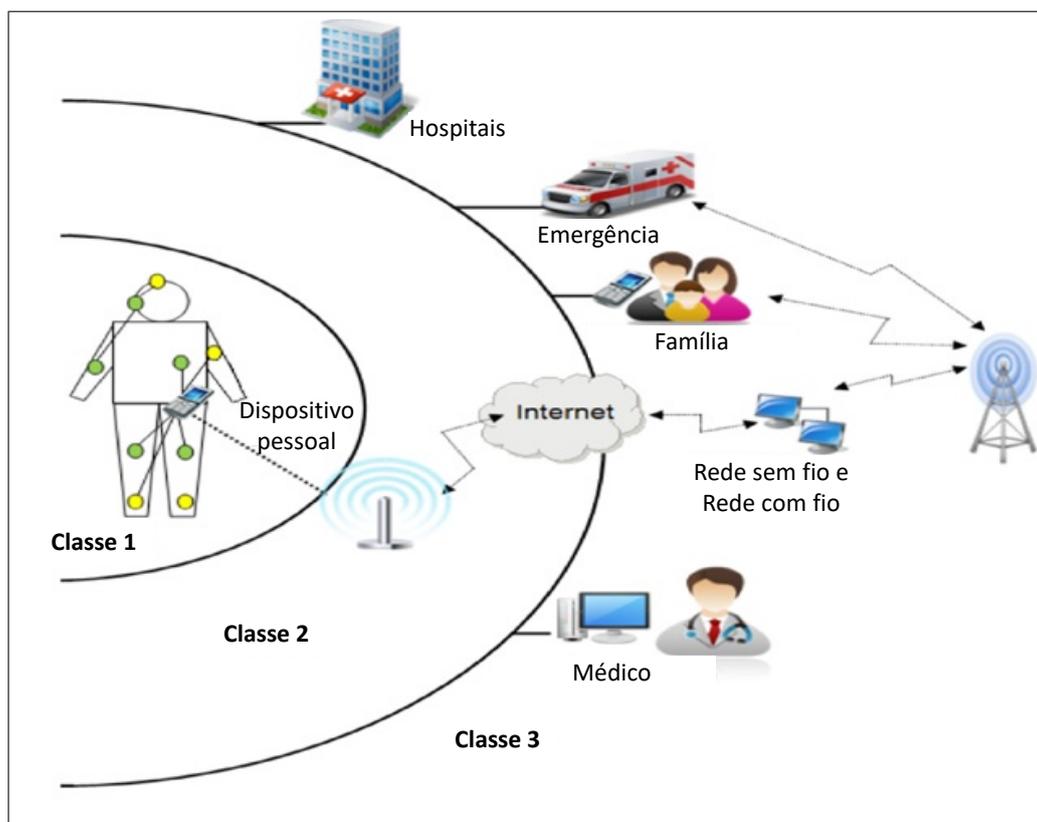


Figura 4.3. Arquitetura WBAN [Movassaghi et al. 2014]

Esta banda alocada é usada pelos sinais gerados por desfibriladores implantados e por neuroestimuladores.

UWB (*Ultra-Wide Band*) é descrito por IEEE 802.15.3 [Rhee et al. 2004], um padrão para WPANs (*Wireless Personal Area Networks*) de alta taxa de dados, que oferece uma faixa de 500 MHz e restrições de densidade espectral de até 41,25 dBm / MHz. Os receptores convencionais possuem uma sensibilidade 30 dB maior que os receptores UWB. Isso representa uma proteção adicional em relação a interferência de outros dispositivos WBANs convencionais, já que os receptores UWB não teriam sensibilidade suficiente para reconhecer os sinais emitidos por outros sensores. Além disso, outro recurso que torna a tecnologia UWB uma boa candidata à comunicação WBAN é baixa suscetibilidade a interferência de múltiplos caminhos [Allen et al. 2005].

Uma nova tecnologia, chamada HBC (*Human Body Communication*) [Seyedi et al. 2013], usa o corpo humano como meio de comunicação. A propagação do sinal através do corpo humano é possível devido ao seu acoplamento capacitivo, e o acoplamento galvânico quando uma corrente alternada atravessa o corpo humano [Bae et al. 2012]. A HBC consome menos energia quando comparado ao UWB e oferece uma taxa de bits de 10 Mbps. Além disso, a coexistência de redes HBC é facilmente alcançável, uma vez que o sinal é limitado ao corpo humano. Em HBC, o movimento molecular (também chamado de movimento browniano) afeta a modelagem de camadas física (PHY) e camada de acesso ao meio (MAC).

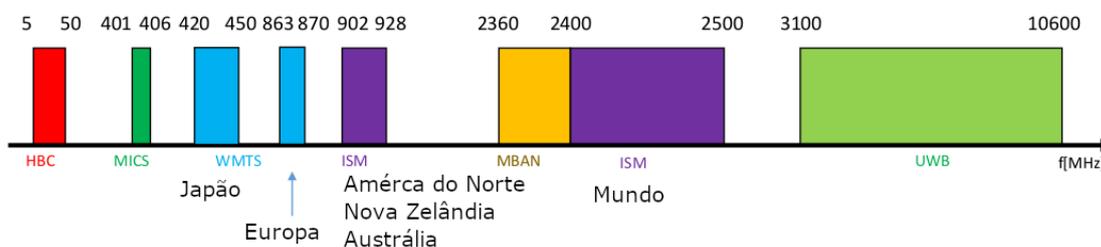


Figura 4.4. Faixa de frequências usadas pelas WBANs. Adaptado de [Cavallari et al. 2014]

Tabela 4.2. Requisitos de taxa de dados para aplicações WBANs

Aplicação	Taxa de dados	Atraso	Taxa de erro de bits (BER)
Monitor de Nível de Glicose	< 1 <i>kbps</i>	< 250 <i>ms</i>	< 10^{-10}
Voz	50 – 100 <i>kbps</i>	< 100 <i>ms</i>	< 10^{-3}
EEG	86,4 <i>kbps</i>	< 250 <i>ms</i>	< 10^{-10}
ECG	192 <i>kbps</i>	< 250 <i>ms</i>	< 10^{-10}
Estimulação cerebral profunda	< 320 <i>kbps</i>	< 250 <i>ms</i>	< 10^{-10}
Endoscopia através da cápsula	1 <i>Mbps</i>	< 250 <i>ms</i>	< 10^{-10}
Fluxo de áudio	1 <i>Mbps</i>	< 20 <i>ms</i>	< 10^{-5}
Fluxo de vídeo	< 10 <i>Mbps</i>	< 100 <i>ms</i>	< 10^{-3}

Em relação aos dispositivos implantáveis, a comunicação ultrassônica pode representar uma abordagem interessante. Ondas ultrassônicas têm menor nível de atenuação do que tecnologias baseadas em RF, principalmente dentro do corpo humano. O corpo humano é constituído predominantemente por água, que oferece menor resistência à propagação de ondas ultrassônicas [Galluccio et al. 2012].

4.2.3. Requisitos de Comunicação

A diversidade de aplicativos impõe vários requisitos para o desenvolvimento de WBANs. Os principais requisitos são recomendados pelo IEEE TG6 [Zhen et al. 2008], como mostrado a seguir.

1. *Taxa de dados e Qualidade de Serviço (QoS)*: a taxa de bits WBAN pode variar de 1 *kbps* (por exemplo, monitoramento da temperatura corporal) a 10 *Mbps* (por exemplo, streaming de vídeo). Uma WBAN pode conter um único ou vários links, sempre que mais de um dispositivo envia dados para um dispositivo pessoal, simultaneamente. No caso de vários dispositivos, mecanismos para Qualidade de Serviço (QoS) devem garantir a priorização do tráfego. As camadas física e de acesso ao meio oferecem métodos para correção de erros e prevenção de interferência, a fim de reduzir o BER (*Bit Error Rate*). Outros parâmetros de transmissão importantes são a latência e o *jitter*. Também é esperado que a WBAN forneça uma resposta rápida e confiável em situações de emergência. A Tabela 4.2 lista alguns requisitos importantes em termos de taxa de bits e QoS para WBANs.

2. *Alcance*: a distância entre os dispositivos WBAN não deve exceder seis metros. Além disso, a topologia em estrela é a configuração de topologia mais típica para as WBANs. O corpo humano representa um obstáculo natural à propagação de RF, principalmente quando se refere a sensores implantados. Uma rede com múltiplos saltos sem fio (*multi-hop*) poderia atenuar esse problema. Neste tipo de rede, os dados são transmitidos de um nó sensor para um dispositivo pessoal através de seus vizinhos mais próximos. Cada WBAN contém vários sensores que podem variar por exemplo de 2 a 10 nós. Uma WBAN geralmente implementa um mecanismo confiável de associação, permitindo que um novo nó seja agregado ou separado de outros em um grupo de nós preexistente, conforme exigido pelo usuário.
3. *Segurança*: a segurança de dados é um requisito primário para WBANs em aplicações médicas e militares. A segurança é tratada em termos de privacidade, confidencialidade, métodos de autorização e integridade de dados. No entanto, os mecanismos atuais de criptografia de dados não são apropriados para WBANs, uma vez que seus nós possuem recursos limitados de processamento, memória e consumo de energia. Existem alguns mecanismos que podem melhorar a segurança da WBAN, como a identificação biométrica.
4. *Antena e canal de rádio*: minúsculas dimensões dos nós WBAN levam a um projeto de antena altamente eficiente. Além disso, o corpo humano afeta o perfil da radiação da antena. Uma caracterização apropriada do canal de rádio é importante para projetar antenas com propriedades de radiação adequadas.
5. *Consumo de energia*: dispositivos WBAN geralmente têm energia da bateria e seu consumo de energia varia de acordo com a aplicação. Espera-se que a vida da bateria seja a de maior tempo possível, especialmente para dispositivos implantados. Isso é obtido usando transceptores de RF de baixa potência e colocando dispositivos WBAN no modo de espera sempre que não estiverem sendo usados. Existem também estudos que consideram o calor [Hoang et al. 2009] e movimento corporal [Von Buren et al. 2006] como fonte de suprimento de energia.
6. *Coexistência*: como mencionado anteriormente, a maioria dos WBANs é projetada para operar na banda ISM. Esta faixa de frequência é usada pela maioria dos dispositivos sem fio. Os principais padrões de transmissão sem fio que operam na banda de frequência ISM são: Wi-Fi (IEEE 802.11) [Bianchi 2000], *Bluetooth* (IEEE 802.15.1) e IEEE 802.15.4/ZigBee [Kirti 2016]. Quando um número de redes sem fio opera na mesma faixa de frequência, a interferência entre elas aumenta a perda de pacotes e diminui o desempenho de WBANs. Isso é um problema especialmente quando ocorre durante eventos de risco à saúde, como por exemplo, um ataque cardíaco. Algumas soluções são tratadas na camada física para mitigar efeitos prejudiciais [Hayajneh et al. 2014]. Existem pesquisas que consideram atividades de outras redes para reforçar os sinais WBAN, ou mesmo retransmitir seus dados de sensores [Heaney et al. 2011].
7. *Projeto do Hardware*: existem restrições significativas de tamanho para dispositivos WBAN. Os aspectos mais críticos são como incorporar a antena e a bateria em um dispositivo minúsculo, oferecendo boa radiação de antena e vida útil da bateria.

Alguns nós WBAN são projetados para serem acoplados a uma peça de roupa, flexível e confortável para o usuário, especialmente durante atividades esportivas ou campanhas militares.

8. *Processamento de sinais*: o consumo de energia pode ser o requisito mais restritivo para dispositivos WBAN. No entanto, técnicas de processamento de sinal mais eficientes podem melhorar o controle sobre o consumo de energia relacionado à aquisição e análise de sinais biológicos. Uma técnica chamada *Compressed Sensing* (CS) permite a amostragem de sinais a uma taxa sub-Nyquist de economia de energia, sem perda de informação [Donoho 2006]. Isso é usado em muitos cenários de WBANs, como EEG (eletroencefalograma), ECG (eletrocardiograma) e EMG (eletromiograma) [Dixon et al. 2012].

4.2.4. Segurança para o Corpo Humano

Radiação é o processo pelo qual a energia é emitida como partículas ou ondas. A radiação eletromagnética inclui desde ondas de rádio a ondas gama. A radiação pode ser classificada como ionizante ou não ionizante, com base em se tem energia suficiente para eliminar os elétrons dos átomos com os quais interage, além de ser capaz de causar danos de menor energia, como quebrar as ligações químicas nas moléculas.

A radiação ionizante, que tem uma frequência mais alta do que a radiação não ionizante, representa uma ameaça à saúde humana. Dependendo dos níveis de exposição, a radiação ionizante pode causar queimaduras, câncer e danos genéticos. Na região do espectro acima de 10^{16} Hz (ultravioleta), a radiação pode ser tratada como ionizante, embora a faixa de frequências não seja muito bem definida.

A maioria das radiações não ionizantes, como a energia de rádio e microondas, é considerada prejudicial à saúde humana para uma determinada quantidade de energia térmica. A energia das partículas de radiação não ionizante é baixa, e ao invés de produzir íons alterados ao passar pela matéria, a radiação não ionizante tem energia suficiente para alterar a configuração de valência vibracional ou eletrônica de moléculas e átomos, produzindo efeitos térmicos. Possíveis efeitos não térmicos de radiação não ionizante em tecidos vivos foram estudados apenas recentemente. Uma dificuldade é que há controvérsias de que as frequências superiores de radiação não ionizante (radiação de microondas e radiação de rádio) são capazes de fato de causar danos biológicos não térmicos. A Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer sugere que pode haver algum risco de radiação não ionizante para os seres humanos [Baan et al. 2011].

Organizações governamentais e não-governamentais declararam alguns limites à exposição relacionada à radiofrequência ou campos eletromagnéticos de uma forma geral. A ICNIRP (Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não-Ionizante) recomenda algumas restrições de tempo de exposição do corpo humano a campos eletromagnéticos não ionizantes. Tais restrições são tipicamente definidas em termos da Taxa de Absorção Específica (SAR - *Specific Absorption Rate*). A SAR é definida como a taxa de absorção de energia eletromagnética por tecido corporal específico, medida por 6 minutos, e sua unidade é de W/kg . Considerando todo o corpo humano, a SAR estimada pelos dispositivos WBAN é insignificante. No entanto, deve ser dada alguma atenção à SAR local, em outros termos, a SAR medida em uma parte específica exposta do corpo

Tabela 4.3. Limites básicos para a exposição do corpo humano aos campos eletromagnéticos estabelecidos pela ANATEL

Categoria de exposição	SAR do corpo inteiro	SAR local (cabeça e tronco)	SAR local (braços)
Ocupacional	0.4	10	20
Público geral	0.08	2	4

humano aos campos eletromagnéticos. A SAR local depende da condutividade elétrica e densidade do tecido sob exposição. Portanto, os dispositivos WBAN devem minimizar a SAR local e obedecer a regulamentos internacionais e padrões regionais [ICNIRP 2009].

Outras organizações preocupadas em estabelecer limites para a exposição aos campos eletromagnéticos ao tecido corporal são o NCRP (Conselho Nacional de Proteções de Radiação), ANSI e IEEE. No Brasil, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) estabeleceu alguns limites relacionados aos efeitos térmicos causados pela exposição desses campos. Os limites são mostrados na Tabela 4.3.

A transmissão de dados de nós sensores sem fio, implantados ou sobre a pele, pode aumentar a temperatura do tecido local e causar efeitos indesejáveis no corpo humano, devido a transmissões mais longas [Movassaghi et al. 2013a]. Os principais efeitos térmicos no corpo humano são:

- Redução do fluxo sanguíneo local.
- Danos térmicos aos órgãos mais sensíveis.
- Alguns tipos de crescimento bacteriano.
- Efeitos sobre os relacionamentos enzimáticos.

A OMS (Organização Mundial da Saúde) estabelece os limites de exposição definidos pela ICNIRP, que são seguidos pela ANATEL. No entanto, a OMS, assim como a ANATEL, consideraram apenas efeitos térmicos. Os efeitos não térmicos do EMERF, prejudiciais à saúde humana, ainda estão em fase de pesquisa. Assim, os riscos biológicos devidos à exposição prolongada ao EMERF devem ser melhor controlados e compreendidos, para que os benefícios dos sensores sem fio no WBAN para a saúde sejam cada vez mais evidentes.

4.2.5. Casos de Uso Relacionados a WBANs

Esta seção descreve três casos de uso relacionados ao uso de WBANs para assistência médica. Esses casos de uso são baseados em padrões de protocolo de transmissão abertos e de código aberto. A Tabela 4.4 lista alguns protocolos de comunicação utilizados nessas aplicações [Al-Fuqaha et al. 2015, Latré et al. 2011, Movassaghi et al. 2014].

1. *Sistema de monitoramento do paciente em casa*: este caso de uso tem como objetivo coletar e medir os sinais fisiológicos de pacientes, entregando-os a um ou vários postos de enfermagem, e identificando situações de risco de vida, considerando o

Tabela 4.4. Alguns protocolos de comunicação usados em WBANs

Protocolo	Tipo	Descrição
IPv6	Endereçamento	IPv6 é a versão mais recente do protocolo da Internet usado pela maioria das WBANs.
RPL	Roteamento	RPL significa <i>Routing Protocol for Low Power and Lossy Network</i> . Este protocolo de roteamento é documentado na RFC6550 para baixa capacidade de processamento e dispositivos com restrição de consumo de energia.
mDNS	Serviço de tradução	mDNS significa <i>Multicast Domain Naming Service</i> . É um protocolo de aplicação que traduz uma URL em um endereço IP correspondente, conforme documentado na RFC 6762.
HTTP REST	Protocolo de aplicação	REST significa <i>Representational Transfer of State</i> . É um protocolo de transferência de mensagens entre elementos da web. Cada um dos elementos da web é identificado por uma URI (<i>Unified Resource Identification</i>). Este protocolo estabelece um conjunto básico de operações de dados, como POST, GET, PUT, DELETE e usa uma arquitetura cliente / servidor tradicional.

contexto clínico do paciente. Nesse caso, os pacientes são monitorados na área da saúde, na residência da própria pessoa, em vez da internação. Os sinais fisiológicos do paciente são coletados por sensores e enviados via Wi-Fi ou outro padrão de comunicação sem fio, como o IEEE 802.15.4. O MQTT (*Messaging Queuing Telemetry Transport*) [Hunkeler et al. 2008] é um protocolo de mensagens para dispositivos de baixo processamento otimizados para redes TCP / IP não confiáveis e de alta latência. O MQTT foi inicialmente proposto pela IBM para sistemas de supervisão e aquisição de dados em redes elétricas, também conhecido como SCADA (*Supervision Control and Data Acquisition*). A troca de mensagens usa o padrão de mensagem de publicação / assinatura (*publish-subscribe*), em que os remetentes de mensagens, chamados publicadores (*publishers*), não enviam mensagens diretamente para destinatários específicos, chamados assinantes (*subscribers*), mas são publicadas em classes hospedadas em um servidor, chamado *broker*. Da mesma forma, os assinantes que manifestarem interesse em uma ou mais classes podem enviar uma mensagem de assinatura para o intermediário. A Figura 4.5 mostra o caso de uso. O MQTT está disponível em formato de código aberto e implementado em vários softwares gratuitos [Torres et al. 2016]. Assim, um aplicativo calcula e consolida como informações as atividades vitais de pacientes monitorados em um painel (*dashboard*). Esse painel pode ser exibido em postos de enfermagem ou em aplicações médicas.

2. *Monitorização e mitigação de perturbações relacionadas com a alimentação*: esta aplicação visa ajudar pacientes com problemas motores (por exemplo, doença de Parkinson) na atividade alimentar diária. O objetivo é compensar os tremores das mãos usando MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*). O paciente usa luvas equipadas com acelerômetros e pequenos MEMS, que reagem aos movimentos da mão. A comunicação entre acelerômetros e atuadores MEMS deve ser com o me-

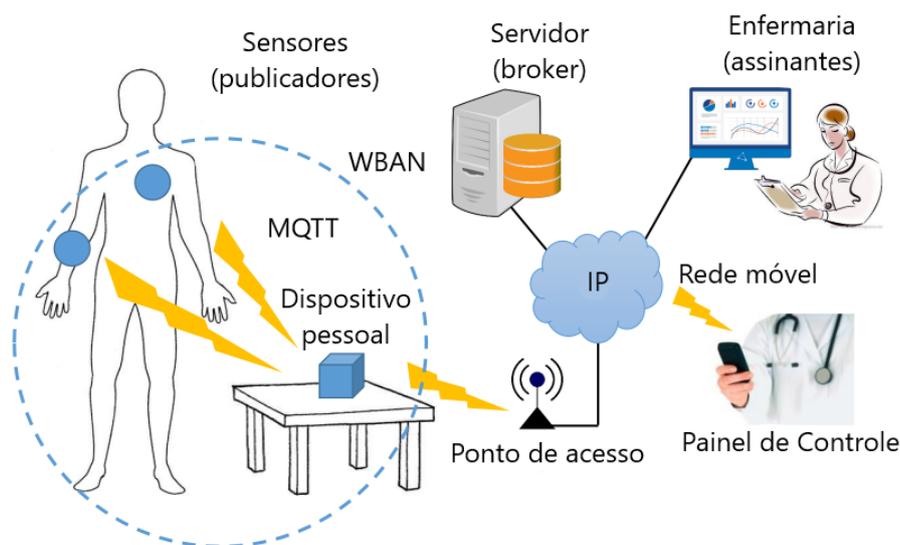


Figura 4.5. Estudo de caso do WBAN: sistema de monitoramento remoto do paciente

nor atraso possível. Assim, o protocolo usado é o DDS [David et al. 2013], que fornece uma ligação direta entre acelerômetros e MEMS. Também é possível transferir alguns dados para um corretor através do protocolo MQTT com o objetivo de compartilhar informações sobre as atividades do paciente, a fim de apoiar alguma análise clínica subsequente.

3. *Sistema de navegação para pessoas com deficiência visual*: pode ser considerado como uma extensão do caso de uso mencionado em (1). Alguns transceptores (por exemplo, DecaWave ou Nanotron) fornecem serviços de localização geográfica em tempo real, também conhecidos como RTLS (*Real-Time Locating Services*). É possível usar o serviço mDNS [Cheshire and Krochmal 2013] para acessar um serviço RTLS local. Então, pode-se mapear as posições dos quartos e móveis em casa. Uma pessoa com deficiência visual poderia ser guiada neste local, evitando obstáculos.

4.2.6. Métricas de Avaliação para WBANs

O desempenho das WBANs está estritamente relacionado com as soluções para enfrentar os desafios presentes nas WBANs. Na literatura para avaliar as diferentes soluções propostas para WBAN, entre elas os protocolos de roteamento, utilizam-se diferentes métricas, as quais são listadas a seguir.

1. *Vida útil da rede*. Define o tempo de operação total da rede até o último nó ficar inativo.
2. *Energia residual*. É a diferença entre a energia inicial e a energia utilizada durante a operação da rede.
3. *Número de nós ativos e inativos*. É o número de nós que depois de um tempo, predefinido, de operação da rede, ainda têm energia ou consumiram toda sua energia respectivamente.

4. *Período de estabilidade*. É o tempo antes de o primeiro nó ficar inativo.
5. *Perda de caminho*. É a diferença entre a potência do sinal transmitido pelo nó transmissor e a potência recebida no nó receptor.
6. *Atraso fim-a-fim (latência)*. É o tempo médio tomado por um pacote de dados para alcançar o nó concentrador da WBAN desde o nó origem.
7. *Taxa de entrega de pacotes*. Determinada pelo número de pacotes recebidos no nó concentrador, divididos pelo número de pacotes enviados desde o nó origem.
8. *Taxa de perda de pacotes*. Determinada pelo número de pacotes perdidos na transmissão, é o número de pacotes perdidos divididos pelo número de pacotes enviados desde o nó origem.
9. *Aumento da temperatura*. Geralmente é uma métrica utilizada para avaliar protocolos que têm como principal objetivo evitar o aquecimento. É uma medida de quanto um nó esquentará durante sua operação.
10. *Vazão (throughput)*. É definida como a taxa real de transmissão de dados através de uma rede. Normalmente é medida em bits por segundo e será sempre menor do que a taxa de transmissão nominal da interface de rede (*bit rate*).
11. *Pacotes reenviados*. É o número de pacotes que são reenviados como causa de um descarte anterior por alguma causa como por exemplo congestionamento.

Das métricas supracitadas, as quatro primeiras estão relacionadas à eficiência energética. As métricas 6, 7, 8 estão associadas à qualidade de serviço (QoS). A métrica 9 está associada à absorção de radiação e aquecimento dos nós. A métrica 10 oferece uma ideia geral de desempenho da rede, pois vários aspectos como: topologia de rede, particionamento topológico, perdas do caminho e limitação de recursos influenciam em seu desempenho.

Considerando a relação entre as diferentes métricas e os desafios impostos por WBANs, conclui-se que as métricas de desempenho mais importantes para avaliar a implementação de WBANs são: vida útil da rede, energia residual, latência, taxa de entrega de pacotes e vazão. Obter melhores valores dessas métricas são objetivos comuns de diversos trabalhos encontrados na literatura, independentemente de suas diferenças operacionais.

4.3. Comunicação em WBANs

A comunicação interna ou nas proximidades do corpo humano é um desafio para o projeto de protocolos para WBANs que sejam adaptáveis, dinâmicos e flexíveis. Portanto, baixo atraso, alta confiabilidade, baixo consumo de energia, baixa interferência eletromagnética no corpo humano e comunicação efetiva são extremamente importantes em WBANs [Bhandari and Moh 2016].

Os objetivos mais comuns em uma WBAN, usualmente solucionados por um protocolo da camada MAC, são atingir o máximo de vazão, o mínimo de atraso e maximizar

o tempo de vida da rede, controlando as principais fontes de desperdício de energia como a colisão de quadros, através da escuta inativa do canal (*overhearing*) e redução da sobrecarga de controle (*overhead*) [Ullah et al. 2009].

Vários protocolos MAC foram estudados para fins específicos, mas foram adotados com algumas modificações para atender aos requisitos inerentes das WBANs. Esta seção apresenta uma visão geral de alguns dos principais protocolos propostos para o cenário das WBANs.

4.3.1. IEEE 802.15.6

O padrão IEEE 802.15.6 [IEEE Std 802.15.6 2012] foi proposto para comunicação sem fio de curto alcance na vizinhança ou mesmo dentro do corpo humano (mas não limitado a humanos). Esta norma utiliza as bandas de radiofrequência científica, industrial e médica (*Industrial, Scientific and Medical - ISM*) existentes, bem como faixas de frequências aprovadas por associações médicas e autoridades reguladoras locais.

Os requisitos padrão incluem suporte para qualidade de serviço (QoS), baixa potência de transmissão, taxas de transmissão de dados de até 10 Mbps e conformidade com as diretrizes de não interferência.

A fim de minimizar a Taxa de Absorção Específica (SAR) do corpo e considerar adequadamente as mudanças nas características do canal de comunicação devido aos movimentos do usuário, as antenas portáteis e os padrões de radiação são modelados para considerar cada tipo de corpo humano (homem, mulher, magro, obeso, etc).

A rede é composta de nós e concentradores (*hubs*), que são organizados em conjuntos lógicos, referidos como BANs (*Body Area Networks*). Os nós são coordenados por seus respectivos *hubs* para acesso ao meio e gerenciamento de energia. Haverá um e apenas um *hub* em uma BAN e vários nós, compondo uma topologia em estrela de um salto, como na Figura 4.6a.

Opcionalmente, um nó com funcionalidade de retransmissão pode ser usado para estender a topologia de estrela para uma topologia de dois saltos, como na Figura 4.6b. As trocas de quadros devem ocorrer diretamente entre os nós e o *hub* da BAN ou, opcionalmente, através do nó com capacidade de retransmissão.

Todos os nós e *hubs* seguem o modelo de referência IEEE 802, tendo uma camada física (PHY) e em uma subcamada de controle de acesso ao meio (MAC). O modelo de referência dentro de um nó ou um hub é mostrado na Figura 4.7. No modelo de referência, a subcamada MAC fornece seu serviço ao cliente MAC (camada superior) por meio do ponto de acesso de serviço (*Service Access Point - SAP*) para a camada MAC, denominado MAC SAP. Enquanto isso, a camada PHY fornece seu serviço para a subcamada MAC através do PHY SAP. O cliente MAC passa unidades de dados de serviços MAC (MSDUs) para a subcamada MAC via MAC SAP, e a subcamada MAC passa quadros MAC, como unidades de dados de protocolo MAC ou MPDUs, para a camada PHY via PHY SAP.

A entidade de gerenciamento de nó (*Node Management Entity - NME*) e a entidade de gerenciamento de *hub* (*Hub Management Entity - HME*) são interfaces de informações de gerenciamento de rede lógicas para trocar informações entre camadas. Elas não são

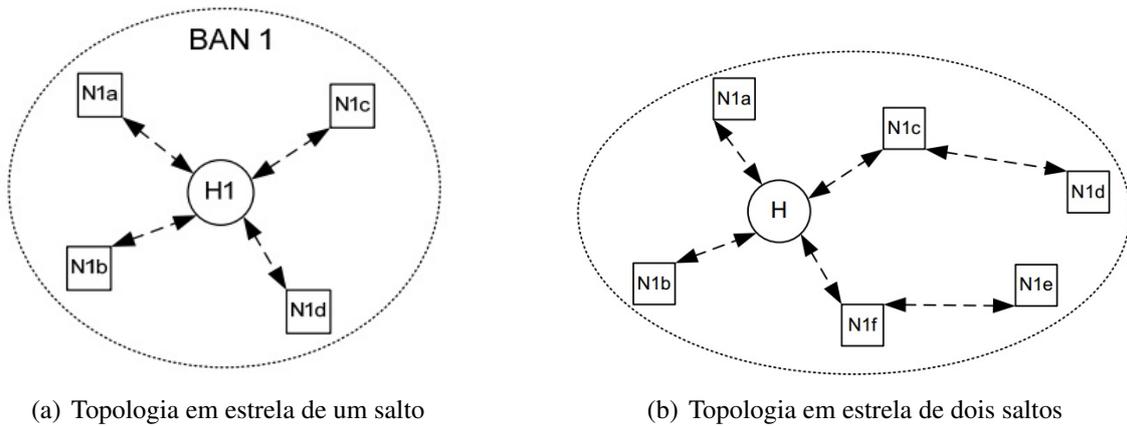


Figura 4.6. Topologia das WBANs [IEEE Std 802.15.6 2012]

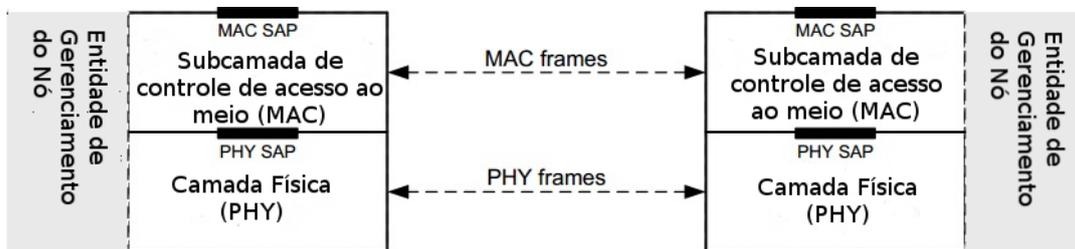


Figura 4.7. Modelo de Referência IEEE 802.15.6 [IEEE Std 802.15.6 2012]

obrigatórias, nem seu comportamento é especificado pelo padrão.

4.3.1.1. Camada Física (PHY)

A camada PHY é responsável pelas seguintes tarefas: ativação e desativação do transceptor de rádio, verificação de uso do canal sem fio (*Clear Channel Assessment - CCA*), transmissão de dados e recepção.

A camada PHY fornece um procedimento para transformar uma unidade de dados de serviço da camada física (PSDU) em uma unidade de dados de protocolo da camada física (PPDU). O IEEE 802.15.6 especificou três diferentes camadas físicas: *Narrow Band (NB)*, *Ultra-Wide Band (UWB)* e *Human Body Communication (HBC)*.

Na PHY NB, o PSDU é pré-anexado com um preâmbulo de camada física e um cabeçalho de camada física para criar a PPDU, como na Figura 4.8. Esses componentes são:

- Preâmbulo da camada física: o protocolo de convergência da camada física (PLCP) é usado para auxiliar o receptor durante a sincronização para recepção e a recuperação do deslocamento da portadora.
- Cabeçalho da camada física: o cabeçalho PLCP transmite as informações necessárias sobre os parâmetros PHY para auxiliar na decodificação da PSDU no recep-

tor decomposta em um campo RATE, um campo LENGTH, um campo BURST MODE, um campo SCRAMBLER SEED, bits reservados, uma sequência de verificação de cabeçalho (HCS) e bits de paridade BCH. O cabeçalho PLCP deve ser transmitido usando a taxa de dados de cabeçalho especificada na faixa de frequência em operação.

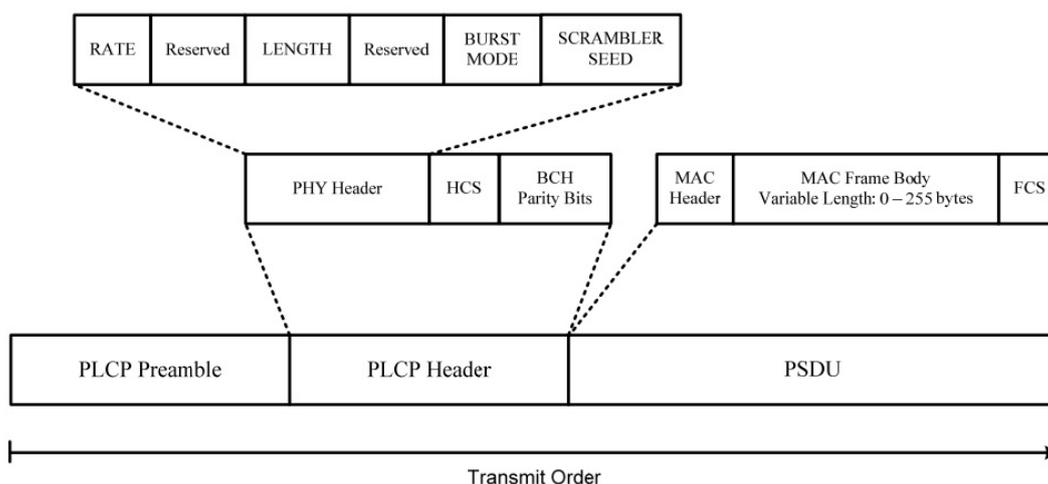


Figura 4.8. Estrutura da unidade de dados da camada física (PPDU) [IEEE Std 802.15.6 2012]

Um dispositivo compatível com PHY NB deve ser capaz de suportar transmissão e recepção em pelo menos uma das seguintes bandas de frequências: 402 MHz a 405 MHz, 420 MHz a 450 MHz, 863 MHz a 870 MHz, 902 MHz a 928 MHz, 950 MHz a 958 MHz, 2360 MHz a 2400 MHz e 2400 MHz a 2483,5 MHz.

A PHY NB usa as técnicas de modulação diferencial por deslocamento de fase DBPSK, DQPSK e D8PSK, exceto em 420-450 MHz onde usa GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*). A taxa de dados da informação pode ser de até 971.4 kbps na PHY NB.

A especificação PHY de banda ultralarga (UWB) foi projetada para oferecer um desempenho robusto para as BANs e fornecer um grande escopo para oportunidades de implementação de alto desempenho, robustez, baixa complexidade e operação em baixa potência. O interesse em UWB reside no fato de que os níveis de potência do sinal estão na ordem daqueles usados na banda do Serviço de Comunicação de Implante Médico (*Medical Implant Communication Service - MICS*), portanto, fornece níveis seguros de energia para o corpo humano e baixa interferência em outros dispositivos.

Existem dois tipos diferentes de tecnologias UWB utilizadas pelo padrão: por impulsos de rádio (IR-UWB) e modulação de frequência (FM-UWB). Em ambas as tecnologias, o PLCP constrói a unidade de dados de protocolo de camada PHY (PPDU) concatenando o cabeçalho de sincronização (SHR), cabeçalho de camada física (PHR) e unidade de dados de serviço de camada física (PSDU), respectivamente. Além disso, os bits PPDU são convertidos em sinais de RF para transmissão no meio sem fio.

O campo PHR contém informações sobre a taxa de dados do PSDU, comprimento

do quadro MAC, formato do pulso, modo burst, HARQ e a semente do embaralhamento. O cabeçalho de sincronização (SHR) deve ser dividido em duas partes. A primeira parte é o preâmbulo, destinado à sincronização de temporização, detecção de pacotes e recuperação de deslocamento de frequência da portadora. A segunda parte é o delimitador de início de quadro (SFD) para sincronização de quadros. O UWB pode operar em dois grupos de bandas de frequência, banda baixa e banda alta, existem várias frequências opcionais e as seguintes frequências obrigatórias: 3993,6 MHz em banda baixa e 7987,2 MHz em banda alta.

A camada física de comunicação no corpo humano (PHY HBC) usa a tecnologia de comunicação de campo elétrico (EFC). Espera-se que ela tenha uma ampla gama de aplicações, como controle de entrada de salas, segurança de escritório, assistência médica, logística, serviços pessoais avançados e entretenimento. No campo de segurança de escritório, por exemplo, um usuário poderia especificar o documento que deseja imprimir apenas tocando nele.

O pacote HBC é composto por preâmbulo PLCP, delimitador de início de quadro (SFD), cabeçalho PLCP e carga PSH (PSDU). No PLCP, uma sequência de preâmbulo é transmitida quatro vezes para conseguir a sincronização de pacotes. O campo SFD / RI é usado como delimitador de início de quadro (SFD) para o pacote não-*burst* ou é usado como um indicador de taxa (RI) para o pacote *burst* (rajada). O cabeçalho do PLCP contém informações sobre taxa de dados, informações do sinal piloto, um sinalizador do modo rajada, comprimento do quadro MAC e um campo CRC8. Um dispositivo compatível deve ser capaz de suportar transmissão e recepção na faixa de 21 MHz.

4.3.1.2. Camada MAC

Entre as principais razões para o desperdício de energia em redes sem fio estão: (1) colisão de quadros, que ocorre quando mais de um quadro é transmitido ao mesmo tempo, ocorrendo assim perdas de quadros por colisão, e aumentando o consumo de energia com as retransmissões desses quadros perdidos; (2) *idle listening* (escuta ociosa), que ocorre quando um nó escuta um canal ocioso para receber dados; (3) *over hearing*, que ocorre quando um nó escuta o canal para receber quadros que são destinados a outros nós; (4) *packet overhead*, refere-se a transmissão de pacotes e informações de controle adicionadas aos cabeçalhos. O número de pacotes de controle usados para realizar o processo de comunicação de dados também influencia o consumo de energia [Sruthi 2016].

Todos esses aspectos estão estritamente relacionados com as funções da camada MAC, que incluem o controle de acesso ao canal, agendamento da transmissão, empacotamento dos dados e delimitação de quadros (*data framing*), manipulação de erros e gerenciamento de energia. Portanto, nesta camada, um protocolo com um mecanismo de acesso ao meio eficiente é de muita importância para ajudar na eficiência energética.

Os protocolos MAC geralmente usam o TDMA (*Time Division Multiple Access*) ou CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) para o acesso justo ao meio compartilhado. Outras soluções como FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) e CDMA (*Code Division Multiple Access*) não são adequados para WBAN, devido à complexidade de hardware e alto poder computacional que eles precisam. Porém

CSMA/CA foi projetado para redes dinâmicas e presume-se que as WBANs não são tão dinâmicas, além disso tem um consumo adicional de energia associado a evitar colisões. Por outro lado os protocolos MAC baseados em TDMA requerem um consumo de energia extra para a sincronização [Javaid et al. 2013].

Com base nessas considerações, no padrão IEEE 802.15.6, foi definido um protocolo MAC específico para WBAN, projetado para operar dentro e ao redor do corpo humano. Este protocolo é apresentado a seguir.

Um quadro MAC, de acordo com o padrão IEEE 802.15.16 ilustrado na Figura 4.9, consiste em um cabeçalho MAC de tamanho fixo, um corpo de quadro MAC de comprimento variável e um campo FCS (*Frame Check Sequence*) de comprimento fixo. O cabeçalho MAC contém as informações de controle do quadro, como versão do protocolo, política de reconhecimento, nível de segurança, retransmissão, etc.. Além disso, o cabeçalho informa o endereço MAC do destinatário, endereço MAC do remetente e identificador da BAN. O corpo do quadro MAC possui dois campos opcionais para fins de segurança, o número de sequência de segurança de baixa ordem e o código de integridade de mensagem (MIC) e a carga útil. O campo FCS utiliza CRC de 16 bits para detecção de erro.

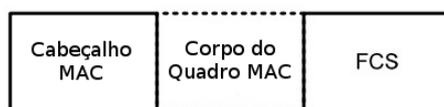


Figura 4.9. Formato do Quadro MAC [IEEE Std 802.15.6 2012]

Existem três modos diferentes de operação em relação a diferentes estratégias de modos de acesso: o modo *beacon* com períodos de *beacon* (superquadro), modo sem *beacons* com superquadros e modo sem *beacons* sem superquadro.

No modo *beacon* com superquadros (*superframes*), o *hub* deve organizar as fases de acesso aplicáveis em cada período ativo (superquadro). Essas fases de acesso são fase de acesso exclusivo (EAP), fase de acesso aleatório (RAP), fase de acesso gerenciado (MAP) e uma fase de acesso com contenção (CAP). Nos intervalos de alocação de EAP, RAP e CAP, um nó pode obter e iniciar transações de quadros, usando o acesso aleatório baseado nos protocolos *Aloha* ou CSMA/CA. No MAP, o *hub* deve organizar os intervalos de alocação e agendar as transmissões. Em um modo não-*beacon* com superquadros, há apenas um período de acesso MAP.

No modo sem *beacons* sem superquadros, um *hub* pode fornecer intervalos de alocação não programados. Um nó pode tratar qualquer intervalo de tempo como uma porção de EAP1 ou RAP1 e empregar acesso aleatório baseado em CSMA/CA para obter uma alocação com contenção.

Funções MAC como QoS e Gerenciamento de Energia são executadas da seguinte maneira:

- A QoS é executada usando diferentes prioridades de usuário (UPs) com limites diferentes de janela de contenção (CW) para o CSMA/CA e limiares de probabilidade de contenção (CP) para acesso *Slotted Aloha*.

- Um nó com pouca energia armazenada em bateria pode hibernar, isto é, estar em estado inativo ao longo dos seus períodos de *beacons* (superquadros). Um campo de Capacidade MAC é usado para este propósito e um nó pode configurar um contador de períodos de inatividade, ou seja, por quantos superquadros ele ficará inativo até que acorde. Quando acordar, deverá realizar suas transmissões e recepções e, ao término do superquadro, retorna a hibernar e reinicia o contador. Além disso, durante o período MAP dentro de um superquadro, o nó pode permanecer inativo, caso não tenha sido agendada nenhuma transmissão ou recepção para o mesmo.

4.3.2. Outros Protocolos MAC Propostos

Vários outros protocolos foram usados para cenários WBAN ou foram propostos para este fim. O padrão IEEE 802.15.4 [IEEE Std 802.15.4 2006b] tem sido um dos focos principais de muitas pesquisas durante os últimos anos. Algumas das principais razões para selecionar o IEEE 802.15.4 para uma WBAN são a comunicação de baixa potência e o suporte para aplicativos WBAN de baixa taxa de dados. Mas como o IEEE 802.15.4 funciona em uma banda não licenciada, problemas de conectividade em tempo real e corrupção de dados são inevitáveis. Além disso, não há mecanismo de QoS no protocolo, que é um recurso fundamental em um cenário WBAN.

Um outro protocolo proposto é o H-MAC [Li and Tan 2010]. É um protocolo MAC que usa o batimento cardíaco para realizar a sincronização entre os nós e reduzir custos extras de energia. Embora o H-MAC reduza o custo extra de energia necessário para sincronização, ele não suporta eventos esporádicos e o ritmo dos batimentos cardíacos depende da condição do paciente.

O protocolo PMAC [Ullah et al. 2014] é um protocolo baseado no padrão IEEE 802.15.6 e BodyMAC [Marinkovic et al. 2009a]. Ele usa dois períodos de acesso, um com contenção (CAP - *Contention-Access Period*) para acomodar tráfego normal e vital, como no IEEE 802.15.6, e um período livre de contenção (CFP - *Contention-Free Period*) para acomodar uma grande quantidade de quadros de dados, como no BodyMAC. No PMAC, o período CFP consiste em vários *slots* TDMA e é usado para uma grande quantidade de dados, incluindo dados de *streaming*.

Em [Sruthi 2016] e [Javaid et al. 2013], apresenta-se um estudo de protocolos MAC eficientes em termos de energia propostos para WBAN. Este estudo inclui, além do protocolo MAC definido no padrão WBAN, outros como: *Battery-Aware TDMA Protocol* [Su and Zhang 2009], *Priority-Guaranteed MAC Protocol* [Zhang and Dolmans 2009], *Energy-efficient Low Duty Cycle* (ELDC) [Marinkovic et al. 2009b], *Power-efficient MAC Protocol* [Al Ameen et al. 2011], *Energy-efficient Medium Access Protocol* (EMAP) [Omeni et al. 2008] e *Adaptive Energy-Efficient MAC* [Van Dam and Langendoen 2003], entre outros. Desses protocolos, os que oferecem melhor desempenho para WBAN são o definido no padrão IEEE 802.15.6 MAC e o protocolo *Adaptive Energy-Efficient MAC*, também conhecido como T-MAC (*Time-out MAC*).

A eficiência energética é o principal desafio encarado pelo protocolo T-MAC [Van Dam and Langendoen 2003], embora também atinja a escuta ociosa. Este usa ciclos de trabalho (*duty cycles*) flexíveis para aumentar a eficiência energética. Cada nó periodicamente acorda para se comunicar com seus vizinhos e depois de passado o pe-

ríodo de atividade, vai dormir novamente até o próximo quadro. Para reduzir a escuta ociosa, transmite todas as mensagens em rajadas de comprimento variável e dorme entre rajadas. Durante o período de inatividade do nó, as novas mensagens são colocadas numa fila, e são enviadas quando o nó acorda. Os nós se comunicam entre si usando o esquema *Request-To-Send* (RTS), *ClearTo-Send* (CTS) e reconhecimento de dados (ACK), evitando colisão e fornecendo transmissão confiável.

O protocolo T-MAC foi implementado na camada MAC do simulador Castalia [Boulis et al. 2011]. Este simulador foi desenvolvido especificamente para a simulação de WBANs. E a implementação de T-MAC em Castalia foi feita em 2010, quando ainda não se tinha disponível o padrão IEEE 802.15.6. Em [Tselishchev et al. 2010], os responsáveis por essa implementação expõem que T-MAC foi escolhido porque era um protocolo MAC popular e bem-sucedido, conforme trabalhos encontrados na literatura [Sruthi 2016] e [Javaid et al. 2013].

4.3.3. Protocolos de Roteamento

Dado que os aspectos relativos ao roteamento em WBAN não estão definidos no padrão IEEE 802.15.6, e também motivados pela busca de soluções para enfrentar os desafios de WBAN, a maioria dos trabalhos de pesquisa em WBANs nos últimos anos estão focados no desenvolvimento de novos protocolos de roteamento.

Na atualidade, existe um número considerável de protocolos desenhados para WBAN já desenvolvidos, e também foram feitos vários estudos focados somente nesses protocolos. Em [Bhanumathi and Sangeetha 2017], apresentam-se os resultados obtidos nesta área de pesquisa de WBANs, mostrando as principais características de mais de 50 protocolos de roteamento desenvolvidos até 2017.

Os protocolos de roteamento propostos para as WBANs foram inicialmente classificados em cinco tipos, de acordo com os seus objetivos [Movassaghi et al. 2013b], [Effatparvar et al. 2016] e estão estritamente relacionados com os desafios identificados em WBANs. Estes grupos são categorizados como: algoritmos de roteamento baseados em cluster, baseados na qualidade de serviços (QoS), baseados em movimentos corporais, cientes da temperatura e protocolos *cross-layered*.

A seguir apresenta-se cada uma destas categorias de protocolos propostos para WBAN. Em cada uma dessas categorias, alguns protocolos encontrados na literatura são comentados.

4.3.3.1. Protocolos de Roteamento Baseados em Cluster

Os protocolos de roteamento baseados em cluster (*Clustered*) são protocolos que tentam agrupar os nós da rede em clusters diferentes e atribuir a um nó, chamado cabeça de cluster (*cluster head*), a missão de encaminhar dados dos sensores de seu cluster, para a o nó coletor (*sink*) ou estação base. Esta transmissão pode ser direta desde o nó cabeça de cluster até o *sink* ou através de outros nós cabeça de cluster. Estes protocolos visam minimizar o número de transmissões diretas de nós sensores para o nó coletor. No entanto, a sobrecarga de número de saltos e atrasos exigidos para a seleção de clusters são as

principais desvantagens desses protocolos.

O protocolo AnyBody foi apresentado em [Watteyne et al. 2007], como um protocolo de auto-organização em que os sensores ligados a uma pessoa são agrupados em clusters. Esse processo é executado em cinco etapas. Primeiro, um nó descobre quais outros nós podem se comunicar diretamente, trocando mensagens HELLO (etapa 1). Então, com base nessas informações, é calculado o parâmetro densidade como a razão entre o número de links e o número de nós dentro da vizinhança a 2 saltos (2-hop), logo depois, cada nó envia uma mensagem HELLO contendo sua densidade e recebe a densidade de seus vizinhos. Baseado nessa densidade, os nós são agrupados em clusters (etapa 2) e é selecionado um cabeça de cluster para cada cluster (etapa 3). A seguir, os clusters são então interconectados (etapa 4) e os caminhos de roteamento são configurados em direção ao nó coletor (etapa 5).

O protocolo HIT proposto em [Culpepper et al. 2004] foi projetado para coletar dados em redes de microssores sem fio. Este protocolo é baseado em uma arquitetura híbrida que consiste em um ou mais clusters, e cada um baseado em múltiplas transmissões indiretas de múltiplos saltos. Foi desenhado para minimizar o consumo de energia e o atraso da rede, e para atingir esses objetivos são usadas transmissões paralelas tanto na comunicação entre clusters quanto intra clusters. Isso é possível porque cada sensor calcula de forma independente um escalonamento TDMA para o controle do acesso ao meio.

O protocolo HIT consiste nas seguintes fases: (1) Eleição de Cabeças de Clusters: um ou mais cabeças de cluster são eleitos; (2) Anúncio dos Cabeças de Clusters (*Cluster-Head Advertisement*): os cabeças de cluster transmitem seu status por toda a rede para formar um ou mais clusters; (3) Configuração do Cluster (*Cluster Setup*): são formados os clusters e os relacionamentos upstream e downstream de cada cluster, pois várias rotas são descobertas dentro de cada cluster, desde os nós sensores até o cabeça de cluster; (4) Determinação do conjunto de bloqueio (*Blocking Set Computation*): cada nó calcula seu conjunto de bloqueio, que é uma lista de nós que não podem se comunicar ao mesmo tempo com esse nó; (5) Configuração da rota: os sensores dentro de um cluster formam rotas de vários saltos até o cabeça do cluster; (6) Criação de escalonamento TDMA: um escalonamento de TDMA é calculado para permitir transmissões paralelas; (7) Transmissão de dados: é uma fase de estado estacionário longo em que os dados detectados são enviados para a estação base.

De forma geral os protocolos baseados em cluster estão focados principalmente ao melhorar a eficiência energética da rede sem dar atenção aos outros desafios de WBAN. Por isso se considera que estes protocolos não são os mais convenientes para ser utilizados nas WBANs. Também a análise de desempenho desses protocolos, nas propostas dos seus autores, é feita comparando com outros protocolos não projetados para WBANs como o LEACH proposto em [Heinzelman et al. 2000] e PEGASIS proposto em [Lindsey and Raghavendra 2002].

4.3.3.2. Protocolos de Roteamento Baseados em Qualidade de Serviço (QoS)

Os protocolos baseados em QoS fornecem principalmente módulos separados para diferentes métricas de QoS que operam de maneira coordenada. Assim, eles oferecem maior confiabilidade, menor atraso fim-a-fim e maior taxa de entrega de pacotes. Esses protocolos sofrem principalmente de alta complexidade devido aos vários módulos e diferentes métricas de QoS que possuem e operam simultaneamente.

Um exemplo é o protocolo TLQoS (*Thermal-aware QoS routing protocol*) proposto em [Monowar and Bajaber 2015]. Este é um protocolo de roteamento baseado em QoS consciente da temperatura, que permite ao sistema alcançar a QoS desejada em termos de atraso e confiabilidade para diversos tipos de tráfego, ao mesmo tempo que evita o aquecimento dos nós. Com o fim de fornecer QoS para diversos tipos de tráfego, considerando atraso e confiabilidade como a métrica de QoS, classifica-se o tráfego em quatro tipos: crítico (*Critical traffic*), com restrição de atraso (*Delay constrained traffic*), com restrição de confiabilidade (*Reliability constrained traffic*), regular (*Regular traffic*). Este protocolo utiliza uma abordagem completamente modular para lidar com o tráfego de acordo com suas respectivas demandas de QoS com o menor aumento de temperatura. Para isso, tem um módulo de atraso, um de confiabilidade e um de temperatura. Também conta com um classificador de pacotes com reconhecimento de QoS, que classifica o pacote de acordo com suas demandas de QoS e o envia para o respectivo módulo para o processamento. O módulo de temperatura lida com o pacote regular (sem restrições de atraso e confiabilidade) e garante que o pacote alcance o coletor através de uma rota de temperatura mais baixa. Os outros tipos de pacotes são processados pelo módulo correspondente de acordo com suas demandas de QoS.

Para enfrentar os desafios associados às mudanças do ambiente sem fio no interior do corpo humano, causadas pela variabilidade na perda de caminho (*path loss*) que impõem os diferentes tipos de tecidos do corpo, no protocolo TLQoS se implementa o roteamento localizado baseado em métricas que requerem apenas informações da vizinhança local, para isso define vários potenciais de roteamento, que consistem em funções matemáticas, com base nas métricas de QoS e na temperatura do nó. Para evitar a formação de *loops* de roteamento, e para rotear o pacote em direção ao coletor, reduzindo o número de salto, são introduzidos os potenciais híbridos que consideram a união dos diferentes potenciais de roteamento, e um mecanismo de evitar *loops* de roteamento.

Em [Bhanumathi and Sangeetha 2017], são apresentados 32 protocolos baseados em QoS. Destaca-se o protocolo DMQoS (*Data-centric Multi objective QoS-aware routing protocol*) proposto em [Razzaque et al. 2011]. Foi apresentado como o primeiro projeto completo de um protocolo de roteamento multi-objetivo centrado em QoS para WBANs, que possui clara diferenciação na seleção de rotas entre múltiplos tipos de tráfego em relação aos seus requisitos de QoS. Ele também reduz o custo de energia e a sobrecarga de operação do protocolo, melhorando o desempenho da rede. O DMQoS utiliza arquitetura modular e utiliza localizações geográficas para implementar o roteamento localizado. Realiza o roteamento com reconhecimento de QoS fim-a-fim com decisões locais em cada nó intermediário sem descoberta e manutenção de caminho fim-a-fim. Essa propriedade é importante para a escalabilidade de redes de sensores, auto-adaptabilidade à dinâmica de rede e adequação a várias classes de fluxos de tráfego.

Em DMQoS, os pacotes de dados são divididos em quatro classes: pacotes de dados ordinários (OD - *Ordinary Data Packets*), pacotes de dados controlados por confiabilidade (RP - *Reliability-Driven Data Packets*), pacotes de dados controlados por atraso (DP - *Delay-Driven Data Packets*) e pacotes de dados críticos (CP - *Critical Data Packets*).

A arquitetura de roteamento do DMQoS é constituída por cinco módulos: (1) Classificador de pacote dinâmico: recebe os pacotes de dados do nó vizinho ou das camadas superiores e classifica-os em uma das quatro categorias supracitadas e os encaminha para seus respectivos módulos em uma base FCFS (*First-Come-First-Serve*); (2) Módulo de encaminhamento geográfico com reconhecimento de energia: decide o nó do próximo salto com menor distância e energia residual relativamente alta usando a Otimização Lexicográfica (LO) multi-objetivo. A LO multi-objetivo é utilizada para gerenciar a compensação entre a informação geográfica e a energia residual para garantir uma taxa de consumo de energia homogênea para todos os nós; (3) Módulo de controle de confiabilidade: determina o próximo salto com maior confiabilidade. (4) Módulo de controle de atraso: localiza o próximo salto com menos atraso. (5) Módulo de enfileiramento ciente de QoS: é responsável por encaminhar o pacote de dados recebido para uma das quatro filas de classes com base nas prioridades atribuídas.

Baseado nessa arquitetura, os nós sensores enviam os dados detectados para o coordenador, o qual é um nó central que atua como uma cabeça de cluster e possui menos restrições em termos de energia e capacidade de computação em comparação com os nós sensores.

Em [Khan et al. 2012a], propõe-se o protocolo EPR (*Energy-aware Peering Routing protocol*), que embora esteja dentro do grupo dos baseados em QoS, também foi projetado com o fim de melhorar a confiabilidade e reduzir o tráfego de rede e o consumo de energia. Os autores propõem uma nova arquitetura de rede BAN para ambientes hospitalares internos e um novo mecanismo de descoberta de pares com construção de tabelas de roteamento que ajuda a reduzir a carga de tráfego de rede, o consumo de energia e melhora a confiabilidade da BAN, com base em abordagens centralizadas e distribuídas.

Esta arquitetura considera três tipos de dispositivos de comunicação: (1) Coordenador de monitor médico (MDC - *Medical Display Coordinator*): são dispositivos para exibir os dados do paciente, com fontes de alimentação substituíveis; (2) Coordenador de rede de área corporal (BANC - *Body Area Network Coordinator*): tem energia limitada e é responsável por coletar os dados dos nós sensores e encaminhá-los para os MDCs correspondentes; (3) Coordenador de estação de enfermagem (NSC - *Nursing Station Coordinator*): é um dispositivo centralizado com fonte de alimentação contínua, que mantém o *peering* e o tipo de informação de comunicação de todos os BANCs. Como existem muitos MDCs no hospital, para exibir em tempo real os dados da BAN no MDC dedicado ao paciente correspondente, é proposto um método de *peering* híbrido. Nesse caso, a comunicação BAN vai ter dois modos: centralizado e distribuído. No modo centralizado, a BAN irá se conectar ao NSC para obter as informações de *peering* e no modo distribuído a BAN descobrirá e enviará dados para seus pares.

Nesta proposta, na hora de encaminhar os dados, para selecionar o nó do próximo salto levando em consideração os requisitos de QoS dos dados é usado o protocolo

de roteamento DMQoS. Como diferencial incluem-se três novos aspectos: (1) Troca de mensagens HELLO: esta mensagem entre outras informações contém a energia residual e distância desde o nó emissor até o destino; (2) Tabela de vizinhos: onde cada nó tem a informação referente a cada um dos seus vizinhos; (3) Tabela de rota: já que na tabela de vizinhos podem existir vários registros para uma mesma entrada, considera-se um novo algoritmo de construção de tabela de roteamento para filtrar a tabela de vizinhos e escolher apenas a entrada com o menor custo de comunicação.

O protocolo QPRD (*QoS-aware Peering Routing protocol for Delay sensitive data*) proposto em [Khan et al. 2012b] tenta melhorar o já citado EPR e tem como principal objetivo diminuir o atraso fim-a-fim, classificando os pacotes de dados dos pacientes em duas categorias: Pacotes Ordinários (OP - *Ordinary Packets*) e Pacotes Sensíveis ao Atraso (DSP - *Delay Sensitive Packets*). Para QPRD, diferente de DMQoS, a arquitetura de roteamento é dividida em sete módulos: (1) Receptor MAC: recebe os pacotes de dados dos outros nós; (2) Classificador de pacotes: classifica os pacotes recebidos como pacotes HELLO ou pacotes de dados; (3) Módulo de atraso: monitora os diferentes tipos de atrasos e encaminha os resultados para a camada de rede para descobrir o atraso do nó; (4) Módulo de protocolo HELLO: é o responsável por enviar e receber pacotes HELLO; (5) Módulo de serviço de roteamento; recebe os pacotes de dados das camadas superiores e o classificador de pacotes, os categoriza como OP ou DSP e escolhe o melhor caminho para cada categoria; (6) Módulo de filas com reconhecimento de QoS: encaminha os pacotes de dados recebidos para sua fila correspondente; (7) Transmissor MAC: armazena os pacotes de dados e os pacotes HELLO recebidos em uma fila em modo *First-Come-First-Serve* (FCFS) e os transmite usando o CSMA/CA.

Outro protocolo projetado para melhorar o EPR é o protocolo QPRR (*QoS-aware peering Routing protocol for Reliability sensitive data*) proposto em [Khan et al. 2013]. Particularmente, este protocolo foca-se em melhorar a confiabilidade fim-a-fim, para satisfazer a necessidade dos dados sensíveis à confiabilidade. Para isso, classifica os dados como Pacotes Ordinários (OP) e Pacotes Sensíveis à Confiabilidade (RSP - *Reliability Sensitive Packets*). A arquitetura de roteamento é a mesma que a de QPRD, com a diferença de que o módulo de atraso é substituído por um módulo de confiabilidade, o qual que é responsável por monitorar e calcular a confiabilidade do link entre dois nós.

O protocolo DMQoS é um dos mais conhecidos dos protocolos cientes de QoS, porque pode diminuir o atraso para informações sensíveis ao atraso e, da mesma forma, pode fornecer roteamento confiável para informações confidenciais. Porém, os protocolos EPR, QPRD e QPRR têm menor consumo de energia quando comparados a outros protocolos de seu tipo.

4.3.3.3. Protocolos de Roteamento Baseados em Movimentos Corporais

Características de WBANs como baixa potência de transmissão para evitar o aquecimento dos tecidos e poupar energia, unidas aos movimentos do corpo humano, criam um cenário onde podem acontecer perdas dos enlaces e mudanças na topologia da rede. Os protocolos baseados nos movimentos corporais tentam enfrentar esse problema de particionamento topológico ou desconexão dos enlaces, causados pelo movimento corporal. Em [Bhanu-

mathi and Sangeetha 2017], são abordados 6 protocolos projetados para este fim, deles os dois com melhor desempenho nos cenários WBAN são o protocolo de roteamento oportunista (*Opportunistic routing*) proposto em [Maskooki et al. 2011] e o protocolo ETPA (*Energy efficient thermal and power aware routing*) apresentado em [Movassaghi et al. 2012].

O protocolo de roteamento oportunista (*Opportunistic routing*) para redes corporais sem fio, proposto em [Maskooki et al. 2011], foi projetado para aumentar a vida útil da rede a partir do movimento das partes do corpo. Como nas WBANs o nó coletor é o dispositivo de maior consumo energético, seria conveniente que seja posicionado em uma parte do corpo de forma não invasiva, permitindo que a bateria possa ser trocada facilmente. Neste protocolo é proposto um modelo de rede, no qual o nó coletor é alocado no punho, por exemplo podendo ser incorporado em um relógio de pulso. Outra vantagem dessa alocação do nó coletor é evitar altas atenuações do sinal RF (Rádio Frequência), que em algumas direções seriam totalmente mascaradas pelo corpo. Por outro lado, o nó sensor está localizado no tórax e mede alguns dados do corpo periodicamente e os envia para uma rede externa através do nó coletor. Também utiliza um nó retransmissor (*relay*) na lateral da cintura, de forma que nessa posição tem linha de visão (LOS - *Line of Sight*) com o sensor de tórax e o nó coletor.

Quando o nó sensor deseja enviar um pacote de dados ao coletor, em primeiro lugar, enviará um quadro RTS (*Request to Send*). O sinal RTS é enviado com o nível de potência que apenas nós da linha de visão podem receber. Se o nó da mão (coletor) estiver na posição LOS, ele enviará um quadro ACK (*Acknowledge*) de volta ao nó sensor dentro de um intervalo de tempo limite especificado. Então, o nó sensor enviará seu pacote diretamente para o coletor. No entanto, se não existe LOS entre o sensor e o coletor, o nó coletor não receberá o quadro RTS e, subsequentemente, o nó sensor não receberá o quadro ACK do coletor no intervalo de tempo limite. Depois do tempo limite, o nó sensor enviará um sinal de ativação para o nó *relay* que só tem o receptor ligado. Quando o nó *relay* estiver pronto, ele enviará um sinal para o nó sensor e o nó coletor para iniciar a comunicação e, em seguida, retransmite os dados do sensor no peito para o coletor da mão. No final da comunicação, o nó coletor enviará uma confirmação de recebimento (RACK - *Receive Acknowledge*) para o nó sensor. Se nenhum RACK for recebido, o procedimento acima será repetido até que ocorra uma comunicação com sucesso. Nesse esquema, se assume que os tempos de associação com o coletor e de envio de pacotes, são muito menores do que os movimentos da mão, portanto, as variações do canal não são consideráveis. Este protocolo tem o consumo energético mais baixo comparado com os de seu tipo.

O protocolo ETPA (*Energy efficient Thermal and Power Aware routing*) apresentado em [Movassaghi et al. 2012] foi projetado principalmente com o fim de reduzir a temperatura do nó e evitar a formação de pontos quentes. Embora considere os níveis de energia e a temperatura dos nós no cálculo da função de custo, é uma abordagem baseada na postura e movimento do corpo humano, já que é baseado no esquema de roteamento definido no protocolo PRPLC (*Probabilistic Routing with Postural Link Costs*) apresentado em [Quwaider and Biswas 2009]. No PRPLC, o impacto da mobilidade da postura humana no particionamento da rede é considerado a partir do Fator de Verossimilhança do Enlace (LLF - *Link Likelihood Factor*), o qual é a probabilidade de que qualquer enlace entre dois nós “i” e “j” estejam conectados por um intervalo de tempo discreto “t”.

A proposta considera WBAN com sete nós colocados no corpo (dois nós nas coxas, dois nos tornozelos, dois na parte superior dos braços e um na cintura). Para evitar a escuta ociosa e diminuir a interferência, os quadros são divididos em intervalos de tempo usando um esquema TDMA (*Time Division Multiple Access*). Durante cada ciclo, todos os nós transmitem, em seu intervalo de tempo alocado, uma mensagem HELLO para todos os seus vizinhos contendo a temperatura e a energia residual dele. Então, cada nó calcula a energia recebida dos nós vizinhos. e utiliza essa temperatura, energia residual e transmissão de energia do nó para calcular a função de custo. Quando um nó precisa empacotar para enviar, ele procura por uma rota eficiente com custo mínimo. Se encontrar nós com uma rota eficiente, ele encaminha o pacote, caso contrário, ele armazena o pacote em um buffer. Caso não se encontre uma rota antes de percorrer um tempo igual à duração de dois quadros, ou seja dois ciclos TDMA, o pacote armazenado no buffer é descartado. Também para diminuir o atraso, cada pacote só pode passar por um número predefinido de saltos (*max_hop_count*), caso contrário, ele será descartado.

4.3.3.4. Protocolos de Roteamento Baseados na Temperatura

Os protocolos baseados em temperatura foram projetados com o objetivo principal de minimizar o aumento da temperatura local ou geral do sistema. De fato, a ideia subjacente a esses protocolos é rotear dados em diferentes rotas para evitar um aumento dramático da temperatura em alguns nós, os quais podem causar danos ao tecido humano. Uma gama de protocolos, abordados em [Movassaghi et al. 2013b] e [Oey and Moh 2013], foram propostos seguindo esta abordagem. No entanto, esses protocolos não incluem métricas de qualidade de rede nem as utilizam de forma alguma. Portanto, eles sofrem com a complexidade do sistema e a sobrecarga do uso de recursos de rede, o que aumenta drasticamente com mais nós. Atualmente, esta abordagem está presente apenas de uma forma combinada com outras abordagens. Dos dez protocolos de roteamento cientes da temperatura abordados em [Bhanumathi and Sangeetha 2017], os que têm melhores resultados para enfrentar os desafios de WBAN são o protocolo M2E2 (*Multi-Mode Energy-Efficient Multihop Protocol*) proposto em [Rafatkah and Lighvan 2014] e o algoritmo de roteamento HPR (*Hotspot Preventing Routing*) proposto em [Bag and Bassiouni 2007].

O protocolo M2E2 (*Multi-Mode Energy-Efficient Multihop Protocol*) foi proposto em [Rafatkah and Lighvan 2014]. Além de reduzir os pontos quentes em WBAN heterogêneas, também reduz o consumo de energia e aumenta o tempo de vida da rede. Neste protocolo se considera um protótipo de rede no qual um nó coletor está localizado no centro do corpo humano e o outro está localizado no domicílio. Para enfrentar os inconvenientes de WBANs heterogêneas, os nós sensores são organizados no corpo humano com base em sua taxa de dados. Os nós sensores com taxas de dados altas são denominados nós sensores pai e estão alocados nas partes menos móveis do corpo humano, e estão ligados diretamente ao coletor no corpo. Os outros sensores de baixas taxas, chamados nós filhos, alocados nas partes do corpo com maior movimento, podem se comunicar diretamente com o coletor ou através de outros nós filhos, em um caminho multi-salto. Por outro lado os nós alocados em casa são capazes de enviar sinais chamados *Home-Signal* e os nós colocados no corpo humano são capazes de recebê-lo. Para o gerenciamento de energia, utiliza uma comunicação combinada de salto único e múltiplos saltos. Este

protocolo apresenta o melhor desempenho quando é comparado com os demais de sua classificação.

M2E2 consiste em quatro fases principais: (1) Fase de inicialização: onde se transmitem mensagens "HELLO" para todos os nós com o objetivo de informar a vizinhança, a posição do nó coletor e todas as rotas possíveis até ele. Os nós sensores atualizam sua tabela de roteamento enquanto trocam as mensagens HELLO. No caso de receber o *Home-Signal*, o processo de roteamento será formado através de nós sensores localizados em casa; caso contrário, o processo de roteamento será formado através de nós sensores no corpo humano; (2) Fase de roteamento: nessa fase, se o *Home-Signal* for recebido, um dos nós sensores no corpo humano é vinculado à tabela de roteamento dos nós fixos em casa. Neste caso, utiliza-se um salto único para o envio de todos os dados. Se o *Home-Signal* não for recebido, a tabela de roteamento é formada nos nós do corpo. Neste outro caso, a fim de reduzir a perda de energia, é usada a comunicação multi-salto para dados normais, mas para dados de emergência, todos os nós sensores implantados no corpo enviarão esses dados diretamente para a estação base; (3) Fase de agendamento: após a seleção da rota na fase de roteamento, o nó coletor programa um intervalo de tempo para a comunicação entre o coletor e os nós sensores com base no TDMA. (4) Fase de transmissão de dados: os nós sensores enviam seus dados para o nó coletor no intervalo de tempo designado.

Em [Bag and Bassiouni 2007], é proposto o algoritmo de roteamento HPR (*Hotspot Preventing Routing*). Este é uma versão melhorada dos protocolos cientes da temperatura LTR (*Least Temperature Routing*) e ALTR (*Adaptive Least Temperature Routing*), abordados em [Oey and Moh 2013]. HPR tem como objetivo evitar a formação de pontos quentes e reduzir o atraso médio na entrega de pacotes e foi implementado em duas fases: (1) Fase de configuração: onde todos os nós trocam as informações do caminho mais curto e da temperatura inicial. Com base nessas informações, cada nó cria sua própria tabela de roteamento; (2) Fase de roteamento: cada nó encaminha os pacotes para o destino usando a rota de menor número de saltos. Um contador de saltos, associado a cada pacote, é incrementado cada vez que um nó reenvia o pacote, e quando o contador exceder o valor limite se descarta o pacote. Se o nó de destino for um dos nós vizinhos, o pacote será encaminhado diretamente. Caso contrário, ele é encaminhado para o nó de próximo salto no caminho mais curto até o destino com temperatura menor ou igual ao valor limite. A temperatura limite de um nó é derivada da temperatura média dos nós vizinhos e da própria temperatura do nó. Se a temperatura do próximo salto no caminho mais curto até o destino for maior que a soma da temperatura do nó de origem e a temperatura limite, o nó o identifica como um ponto quente. Então o pacote é enviado a outro nó vizinho que não tenha sido visitado pelo pacote (para evitar *loops* de roteamento), com menor temperatura.

4.3.3.5. Protocolos *Cross-layered*

Os protocolos de roteamento *Cross-layered* abordam os desafios das camadas de rede e MAC ao mesmo tempo para melhorar o desempenho geral da rede WBAN. Embora esses protocolos tenham alta produtividade, baixo consumo de energia e um atraso fim-a-fim

relativamente fixo, segundo [Movassaghi et al. 2013b], eles não podem fornecer alto desempenho em casos de movimento do corpo e devido às perdas de caminho associadas aos tecidos do corpo humano em alguns cenários. Dos quatro protocolos projetados para esse fim descritos em [Bhanumathi and Sangeetha 2017], os que têm melhor desempenho são o protocolo CICADA (*Cascading Information retrieval by Controlling Access with Distributed slot Assignment*) proposto em [Latré et al. 2007] e o protocolo TICOSS (*Timezone COordinated Sleep Scheduling*) proposto em [Ruzzelli et al. 2007].

O protocolo CICADA (*Cascading Information retrieval by Controlling Access with Distributed slot Assignment*) [Latré et al. 2007] foi proposto com o fim de introduzir menor atraso e baixo consumo de energia, sendo o protocolo que oferece melhor desempenho nessas métricas, dentre os de sua classificação. Neste protocolo, configura-se uma árvore de maneira distribuída e essa estrutura de árvore é usada subsequentemente para garantir um acesso ao meio livre de colisão e para encaminhar dados para o coletor. O uso de energia é baixo, pois é projetado com base em escalonamento TDMA, e os nós podem dormir nos *slots* de tempo onde não estão transmitindo ou recebendo.

A alocação de *slots* de tempo é feita enviando um esquema de um nó pai para um nó filho. Então, um nó calcula seu próprio esquema com base no esquema que recebeu de seu pai. Cada ciclo é dividido em duas partes: o subciclo de controle e o subciclo de dados. Cada subciclo tem seu próprio esquema para alocação de *slots*, o esquema de controle e o esquema de dados. Esses esquemas são enviados no subciclo de controle e são usados para propagar os esquemas dos pais para os filhos. Quando todos os nós recebem seu esquema, o ciclo de controle é finalizado e inicia-se o ciclo de dados. O esquema de dados consiste em 2 partes também, um período de dados e um período de espera. No período de espera, o nó deve permanecer em silêncio e deve desligar seu rádio. No período de dados, o nó recebe dados de seus filhos e envia dados para seu pai. Cada nó pai constrói uma tabela de seus nós filhos que contém o número de *slots* necessários para transmitir os dados ao nó pai e o número de *slots* necessários para receber os dados de seus nós filhos. Cada subciclo de dados tem um *slot* para que novos nós possam entrar na árvore, para isso cada novo nó filho tem permissão para enviar uma mensagem de requisição de entrada na árvore (JOIN-REQUEST) nesse *slot* depois de ouvir o esquema de dados do nó pai desejado.

O protocolo TICOSS (*Timezone COordinated Sleep Scheduling*), proposto em [Ruzzelli et al. 2007], procura melhorar o padrão 802.15.4 através da divisão da rede em zonas de tempo (*timezones*). Para otimizar o padrão 802.15.4, neste protocolo os nós usam períodos alternados de atividade e inatividade para reduzir o consumo de energia e reduzir as colisões de pacotes ocorridas devido aos nós ocultos. Os nós encaminham os pacotes de dados para o nó coordenador usando o roteamento de caminho mais curto. A ideia de dividir a rede em zonas de tempo é adotada por meio de uma tabela conhecida como tabela V, para a programação de transmissão, e a implementação de três *buffers* FIFO para: (1) pacotes *upstream* destinados ao *gateway*; (2) pacotes *downstream*, destinados à rede; (3) pacotes para transmissão local. A principal tarefa do agendamento da tabela V é dividir o tempo em *slots* que são usados para transmitir os pacotes dos *buffers*.

4.3.3.6. Protocolos MANET em WBANs

Características de WBANs como baixas potências de transmissão unido aos movimentos do corpo humano, criam um cenário com mobilidade e restrições de recursos, que também é característico de redes ad-hoc móveis. Porém, em trabalhos como [Latré et al. 2011], [Ullah et al. 2012], [Movassaghi et al. 2013b], é reiterada afirmação de que as restrições de WBAN não podem ser atendidas pelos protocolos de roteamento das redes de sensores sem fio (WSN) e das redes ad-hoc móveis, isso apenas baseado em afirmações conceituais. Por isso, as pesquisas relativas aos protocolos de encaminhamento para WBAN têm sido focadas mais no desenvolvimento de novos protocolos para enfrentar algum dos desafios definidos para WBAN, sem considerar protocolos já desenvolvidos para redes ad-hoc como AODV [Perkins et al. 2003], DSR [Johnson et al. 2007], DSDV [Perkins and Bhagwat 1994], entre outros.

Por outro lado, considerando que o AODV fornece um bom desempenho em cenários com mobilidade e restrições de recursos, em [Ferreira et al. 2017b] se faz uma análise do uso do AODV para o cenário de WBAN. Após a avaliação feita, neste trabalho se mostrou que o AODV é uma alternativa para o roteamento em WBAN, embora precise ser otimizado para um melhor desempenho frente aos desafios de WBANs. De forma similar, outros trabalhos avaliam o desempenho de diferentes protocolos MANETs em cenários WBANs, conforme comentado a seguir.

Em [Ferreira et al. 2017a], apresenta-se um estudo de estabilidade de rotas em cenários WBAN, baseado em dados reais e o protocolo de roteamento AODV. Os resultados experimentais demonstram que o critério de rota com enlaces de melhor qualidade esperado não foi respeitado sempre. Devido principalmente a que o protocolo AODV escolhe a rota encontrada mais rapidamente e não considera uma métrica de qualidade no roteamento. Portanto, afirma-se que a utilização de uma métrica de qualidade do enlace para formação de rotas permitiria evitar as rotas com menor taxa de entrega.

Em [Asogwa et al. 2012], é feita uma análise de desempenho dos protocolos de roteamento AODV, DSR e DSDV, em um cenário baseado nas principais características de WBANs e usando o protocolo IEEE 802.15.4. A análise é feita com a finalidade de examinar a possibilidade de utilizar protocolos MANET em redes WBANs e qual deles seria o melhor. Utilizou-se como métrica de avaliação, a confiabilidade e o atraso. Análises experimentais mostraram que os protocolos reativos AODV e DSR têm boa confiabilidade, enquanto o protocolo proativo DSDV teve perdas de pacotes superiores a 90%.

De forma similar, o trabalho apresentado em [He et al. 2015] realiza uma comparação do desempenho dos protocolos de roteamento AODV e DSDV para cenários WBAN considerando: atraso fim-a-fim médio, taxa de transferência média fim-a-fim, e taxa média de perda de pacotes. Os resultados mostram que AODV tem melhor desempenho.

Em [Tiwari et al. 2014], realiza-se uma comparação e avaliação do desempenho dos protocolos reativos AODV e DSR em cenários WBAN. Os resultados do estudo comparativo, baseado no atraso fim-a-fim e na vazão, mostram que o protocolo de roteamento AODV supera o DSR. No caso do AODV, o atraso é minimizado e a vazão é maximizada em comparação com o protocolo de roteamento DSR. Também mostra que o protocolo de roteamento AODV diminui significativamente o problema de sobrecarga de controle

encontrado no protocolo DSR, já que o RREQ (*Route REQuest*) em DSR transporta a informação da rota completa, enquanto em AODV, RREQ carrega só o endereço de destino. Finalmente, se conclui que o protocolo de roteamento AODV tem uma taxa de sucesso mais alta e uma resposta mais rápida às alterações da topologia da rede.

Por outro lado, em [Kumari and Nand 2016], são comparados os protocolos de roteamento AODV, DSDV, DSR e AOMDV, tanto em cenários WSN quanto WBAN. Como métricas, na avaliação, se consideraram: taxa de entrega de pacotes (PDR - *Packet Delivery Ratio*), atraso fim-a-fim (E2Edelay - *End-to-End delay*) e vazão. O artigo mostra que AODV e sua variante melhorada AOMDV (*An Optimized Ad-hoc On-demand Multipath Distance Vector*) tem o melhor desempenho em termos de PDR, atraso e vazão, tanto para cenários WSN quanto WBAN. Também se mostra claramente que o desempenho desses protocolos é reduzido no ambiente WBAN em comparação a WSN.

Do estudo da literatura, conclui-se que embora o desempenho dos protocolos MANET seja diminuído pelas características das redes corporais, é viável o uso desses protocolos em WBANs, mesmo que ainda exista a necessidade de adaptá-los para enfrentar melhor os desafios de WBAN.

4.4. ISO/IEEE 11073

Com o grande avanço de tecnologias para o monitoramento de pacientes e o crescente interesse por tecnologias digitais aplicadas à saúde, desencadeou-se o desenvolvimento de Dispositivos Pessoais de Saúde (DPS) com interfaces de comunicação embutidas, tais como USB, *Bluetooth* e *ZigBee*. Em cenários que fazem uso de DPS, o paciente também é responsável pelo monitoramento de sua própria saúde e bem-estar [Martins et al. 2014].

Devido ao surgimento desses novos dispositivos, um grupo de trabalho do IEEE definiu a família de normas denominadas ISO/IEEE 11073 [IEEE Std 11073-00103 2012]. Esta família de normas começou a ser especificada na década de 1990, e tinha como finalidade conectar dispositivos médicos em unidades de saúde. Monitores de sinais vitais e monitores de pressão arterial são alguns exemplos desses dispositivos. Seu uso era feito principalmente por profissionais da saúde (médicos, enfermeiras, etc). Contudo, dispositivos de saúde e equipamentos para exercícios físicos (*fitness*) alcançaram o mercado e seu uso doméstico vem crescendo a cada ano. O termo DPS envolve tanto dispositivos médicos, quanto dispositivos de saúde e *fitness* usados por usuários “leigos” em suas residências [IEEE Std 11073-00103 2012]. É comum a venda desses dispositivos juntamente com produtos eletrônicos de consumo geral.

A família de normas ISO/IEEE 11073 é dividida em três grupos, a primeira e mais antiga parte é a ISO/IEEE 11073 *Lower Layer*, que especifica protocolos e serviços de comunicação orientados a conexão, utilizando camadas físicas como infravermelho, tecnologia RF sem fio ou Ethernet [IEEE Std 11073-20101 2004]. Já a parte ISO/IEEE 11073 *Point-of-Care-Devices* especifica normas de comunicação para dispositivos que são usados exclusivamente em unidades de saúde. Por fim, a ISO/IEEE 11073 *Personal Health Devices* (PHD), ou Dispositivo Pessoal de Saúde (DPS), define normas para dispositivos usados pelos usuários em suas casas. Portanto, o foco desta seção será apenas no ISO/IEEE 11073 *Personal Health Devices*. Por questões de simplificação, esta norma será referenciada apenas como IEEE 11073 neste texto.

A norma IEEE 11073 define dois tipos de dispositivos: Agentes e Gerenciadores. Os agentes são tipicamente sensores ou atuadores, de baixa potência e com pouco poder de processamento, enquanto os gerenciadores são dispositivos com um poder de processamento maior, na qual, podem ou não, estar conectados a uma fonte de energia. Apesar de a norma 11073 não comentar explicitamente, dispositivos agentes poderiam ser nós de uma WBAN.

Um dispositivo médico típico é geralmente utilizado em hospitais e manuseado por especialistas. Os dados gerados por esses dispositivos são utilizados para criar diagnósticos e para tratamentos. Dispositivos similares são muitos comuns no dia-a-dia com propósitos de melhorar a saúde, bem-estar, estado físico, etc. Esses aparelhos coletam dados que podem se tornar úteis se compartilhados e reutilizados de forma inovadora. Como por exemplo, uma balança pode enviar leituras para um *personal trainer* específico, ou um médico pode receber dados de leitura de um monitor de pressão sanguínea de seu paciente.

Assim, antes de os dados chegarem em seu destino final (para um especialista da saúde por exemplo), eles devem antes passar por vários outros processos e transformações. Desta forma, o principal objetivo da norma IEEE 11073 é prover um protocolo de comunicação de dados que torne possível implementar DPS com pouca capacidade de processamento.

Os dados gerados por DPS agentes, são transmitidos, primeiramente, para os gerenciadores, que, posteriormente enviam os dados para processamento em centros de telessaúde, profissionais da saúde, amigos, parentes, *personal trainers*, entre outros. O padrão IEEE 11073, portanto, cobre apenas a primeira fase dessa jornada, ou seja, a transmissão dos dados entre os agentes e gerenciadores. *Smartphones*, *desktops* e *tablets* são alguns tipos típicos de dispositivos gerenciadores. Agentes e gerenciadores são conectados, geralmente, através de uma rede local (LAN) ou pessoal (PAN). A Figura 4.10 mostra a comunicação entre DPS e outros componentes de um sistema de saúde.

A fim de oferecer um conjunto completo de padrões, que cubra não apenas a comunicação entre os agentes e os gerenciadores, mas sim, todo o caminho que os dados fazem até chegarem ao seu destino final, A *Personal Connected Health Alliance* (PCHAlliance) publica e promove o *Continua Design Guidelines* (CDG), que define um framework para conexão fim-a-fim de DPS, usando padrões abertos, para criar uma conexão segura e interoperável entre esses dispositivos.

O CDG oferece um conjunto claro de interfaces que permite o fluxo seguro de dados entre os sensores, *gateways* e centros de telessaúde. Além disso, esse guia remove ambiguidade dos padrões para assegurar um ecossistema consistente e interoperável para DPS [PCHAlliance 2017].

Em [Martins et al. 2014], é proposta uma nova arquitetura baseada em dispositivos UPnP (*Plug and Play*) para *Personal Mobile Health*, onde diferentes tipos de dispositivos eletrônicos podem fazer a troca de informações sobre saúde através de tecnologias como XML (eXtended Markup Language).

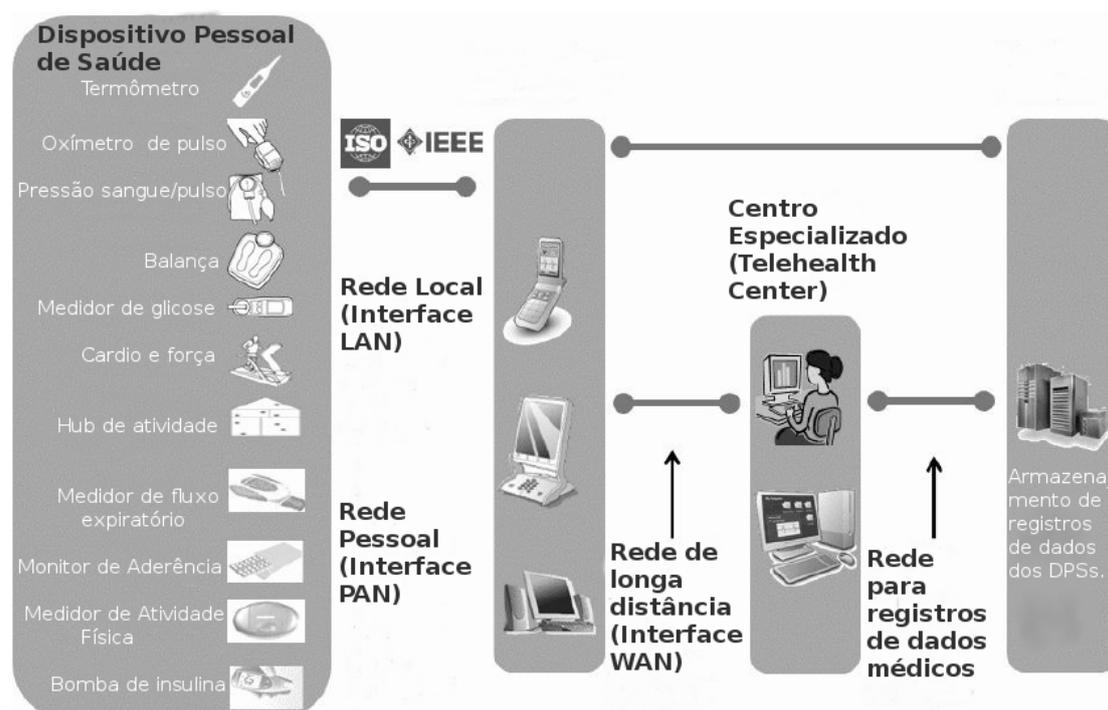


Figura 4.10. Comunicação entre DPS - Continua Connected Health Alliance (Adaptada de [IEEE Std 11073-00103 2012])

4.4.1. Casos de Uso

Em vários contextos, DPS são úteis para o suporte de atividades individuais de diferentes formas. Três grandes famílias de casos de usos podem ser destacadas: Saúde e Atividade Física, Independência para Terceira Idade e Gerenciamento de Doenças.

Equipamentos de força, monitores de pressão sanguínea e balanças são equipamentos frequentemente utilizados para Saúde e Atividades físicas. Os usuários deste grupo, em geral, são pessoas que utilizam vários equipamentos de atividades físicas para manter a saúde em dia. Os dados coletados pelos agentes podem ser armazenados em um PC, e posteriormente, transmitidos para *personal trainers* para avaliação. Os usuários possuem e operam seus próprios equipamentos, e buscam por ajuda de profissionais para montar ou melhorar seus planos de atividades físicas.

Já para Independência para a Terceira Idade, dispositivos como *hub* de atividade de vida independente, monitor de medicação, monitor de pressão sanguínea, balança, termômetro, medidor de glicose e oxímetro de pulso são equipamentos tipicamente utilizados. “Independência” ou “envelhecimento independente” são termos usados, por exemplo, pela *Personal Health Connected Continua Alliance*. Casas inteligentes, com dispositivos sensores e atuadores conectados, podem estender o período de tempo de vida independente para pessoas idosas. Funcionalidades como gerenciamento de aquecedores e abertura de portas podem melhorar a qualidade de vida substancialmente.

Por fim, para o gerenciamento de doenças, também pode-se utilizar o *hub* de atividade de vida independente, monitor de medicação, monitor de pressão sanguínea, ba-

lança, termômetro, medidor de glicose e oxímetro de pulso. Neste grupo, estão pessoas que possuem, por exemplo, sobrepeso e hipertensão, e se não houver tratamento e acompanhamento, podem correr o risco de desenvolver problemas mais graves posteriormente, como doenças crônicas. Dispositivos que fazem o acompanhamento e gerenciamento de tratamentos, podem evitar futuros gastos com consultas médicas, além de proporcionar um acompanhamento da saúde do paciente sem que ele precise sair de casa.

Em implementações atuais de DPS, os usuários precisam manualmente transferir as medidas dos dispositivos para portais na Internet ou sistemas, se desejarem compartilhá-las. Espera-se que, no futuro, esses dispositivos possam fazer esse compartilhamento de forma autônoma e inteligente para sistemas de telessaúde. Dispositivos Pessoais de Saúde sem fio podem ser embutidos em roupas (*smart clothing*) para o registro de frequência cardíaca, altitude, velocidade, perda de calorías e duração de treinos.

Em ambientes onde um DPS é compartilhado, como famílias, lares para idosos e hospitais, um único dispositivo fará várias medições de diferentes pacientes. Uma vez que, esses dispositivos estão conectados a uma rede, métodos seguros de identificação de pacientes são necessários.

Sendo assim, o IEEE 11073 permite o transporte de identificação de pacientes nos dados. De qualquer forma, normas e tecnologias dedicadas à segurança já estão disponíveis, cartões inteligentes, pulseiras, códigos de barras, RFID e muitos outros métodos.

4.4.2. Organização da Norma 11073

Interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes é alcançada quando todos os sistemas envolvido implementam um conjunto comum de normas. A família de normas 11073 foi projetada para a comunicação entre qualquer dispositivo médico.

Os dispositivos agentes são frequentemente de baixo custo, possuem capacidades limitadas de hardware limitada, como memória RAM, CPU e fontes de energia limitadas com utilização de baterias pequenas. Por razões de simplicidade, possuem configuração fixa e são desconectados quando inativos. Em contrapartida, os dispositivos gerenciadores têm mais capacidades de hardware e podem se conectar a vários agentes. Podem possuir uma fonte de energia fixa ou baterias grandes.

A norma IEEE 11073 descreve a estrutura de comportamento dos agentes e gerenciadores utilizando o conceito de *Domain Information Model* (DIM). O DIM descreve as partes e mostra como essas partes devem ser “colocadas” juntas para formar um elemento maior. Nas implementações, são geralmente chamadas de “classes” ou “objetos”. A linguagem ASN.1 (*Abstract Syntax Notation Number One*) descreve os objetos e serviços utilizados no DIM. ASN.1 é uma notação formal tradicionalmente usada para descrever transmissão de dados feitas através de protocolos de telecomunicação.

A família de normas 11073 inclui perfis de especialização, isto é, cada DPS possui uma norma associada, que descreve como esse dispositivo faz sua representação de dados e como as informações são transmitidas para os gerenciadores.

Por exemplo, a norma 11073-10408 define padrões para um termômetro, já a norma 11073-10415 para uma balança. Essas normas são chamadas de “especializações de dispositivos”. Os padrões de especialização de dispositivos definem por exemplo, o

modelo de informação do dispositivo. Neste modelo de informação, são especificados todos os atributos de cada classe ou objeto, assim como métodos e eventos. A Figura 4.11 apresenta o modelo de domínio de informação para um termômetro, conforme a norma 11073-10408.

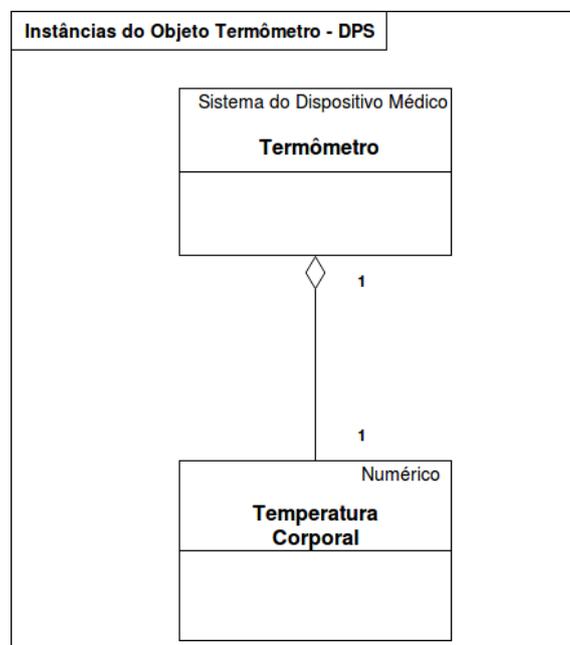


Figura 4.11. Termômetro - Modelo de Domínio de Informação.

A norma IEEE 11073-20601 define um protocolo chamado *Optimized Exchange Protocol*, que é comentado na próxima seção.

4.4.3. Optimized Exchange Protocol - IEEE 11073-20601

Dentro da família de normas 11073, a parte 11073-20601 define um protocolo chamado *Optimized Exchange Protocol* (OEP) que estabelece um framework para um modelo abstrato, o qual implementa uma conexão lógica entre sistemas, garantindo a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes [IEEE Std 11073-20601 2010].

Um dos serviços básicos definidos na norma é a associação entre um agente e um gerenciador. Vários agentes podem estar associados a um gerenciador. A conexão/associação pode acontecer em ambas as direções, porém, o agente normalmente inicia o processo de associação, pois é ele quem detecta novos dados a serem transmitidos. Essa associação consiste nos seguintes passos, como apresentados na Figura 4.12:

O procedimento de associação começa com o agente enviando uma mensagem de *association request* para o gerenciador. Essa mensagem contém, por exemplo, a identificação do agente, informações das funcionalidades que o agente suporta, informações de codificação e decodificação de mensagens. Após o gerenciador receber esta mensagem, ele verifica se é compatível com este tipo de agente, ou se a configuração já é conhecida. Caso a configuração não seja conhecida, o gerenciador responde com uma mensagem de *association response* dizendo que a associação pode ser feita, porém, parâmetros de configuração do agente são necessários. Na Figura 4.12, é considerado que o gerenciador já

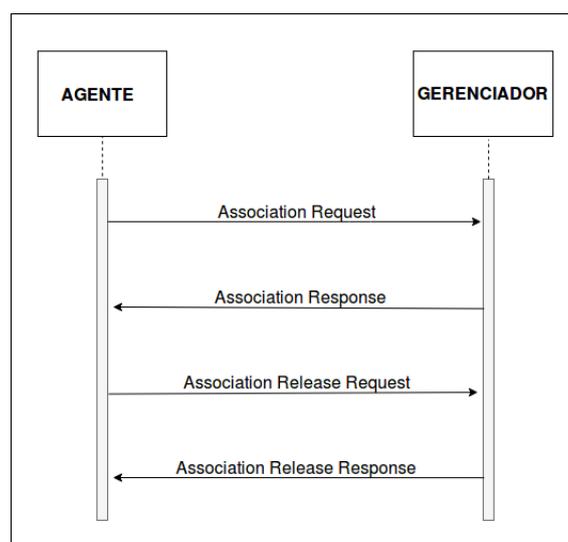


Figura 4.12. Diagrama de sequência da associação de um DPS com um gerenciador.

havia se conectado previamente ao agente, portanto, a mensagem de *association response* não contém o campo de solicitação de parâmetros de configuração do agente.

Quando o agente termina de enviar todos os dados, ele inicia o procedimento de desassociação e envia uma mensagem *association release request* para o gerenciador. O gerenciador vai responder com a mensagem *association release response*. Enfim, ambos os dispositivos vão entrar no estado não associado.

As conexões são normalmente feitas ponta-a-ponta e um agente trabalha com um único gerenciador, entretanto, um gerenciador pode trabalhar com múltiplos agentes. Os dados são transportados por APDUs (*Application Protocol Data Units*). Estas APDUs devem ser processadas automaticamente e podem ser segmentadas e remontadas. O tamanho máximo de uma APDU quando enviada de um agente para um gerenciador é de 63 KB, e quando enviada de um gerenciador para um agente é de 8 KB. Esses limites podem ser reduzidos pelas especializações dos dispositivos.

Antidote IEEE 11073 é uma implementação do protocolo *Optimized Exchange Protocol* (IEEE 11073-20601), desenvolvido pela Signove, como parte da *SigHealth Platform*¹. Esta biblioteca é a primeira implementação de código aberto desse protocolo. Foi desenvolvida em ANSI-C com arquitetura modular, a qual permite a portabilidade do código para diferentes plataformas. Esta biblioteca também permite a comunicação com dispositivos certificados da *Bluetooth Continua Health Alliance* [Martins et al. 2014].

As tecnologias utilizadas para a transmissão de dados de medições biofísicas são divididas em dois grandes grupos: tecnologias de comunicação cabeadas e sem fio. Algumas dessas tecnologias são descritas resumidamente nos próximos parágrafos.

Wireless Personal Area Network (WPAN) é suportada por vários DPS presentes no mercado e está largamente disponível em *laptops* e *smartphones*. Uma WPAN é fre-

¹*SigHealth* é uma plataforma de monitoramento remoto de pacientes e gestão de dados utilizando dispositivos pessoais sem fio para a saúde.

quentemente utilizada para transferir dados de dispositivos móveis para um *smartphone* em curtas distâncias, que posteriormente, transmite os dados para um centro especializado por meio de uma rede WAN. *Cabled PAN bus* é uma tecnologia amplamente utilizada para conectar dispositivos eletrônicos como *laptops* e *desktops* [IEEE Std 11073-00103 2012]. É utilizada também para o carregamento das baterias de eletrônicos e *smartphones*. Essa tecnologia é usada com DPS quando o uso de uma tecnologia sem fio não é viável por motivos técnicos ou por razões de usabilidade. Uma tecnologia muito comum para DPS é WPAN ou WLAN. Dispositivos pequenos e de baixa potência utilizam essa tecnologia para curtas distâncias, por exemplo, dentro de um quarto ou prédio.

Já o uso de TCP, UDP e IP sobre uma rede LAN ou WLAN é realizado por dispositivos de saúde que requerem transferências de volumes maiores de dados. Esses dispositivos geralmente possuem fontes de energia fixa. Por fim, a tecnologia RFID é usada para fins de identificação. Pacientes que permanecem em hospitais por dias ou semanas podem usar pulseiras que facilitam sua identificação.

4.4.4. Segurança

Dentro do contexto de comunicação de DPS, a segurança é bastante importante, pois informações médicas são consideradas altamente sensíveis. Proteção adequada para estas informações são necessárias tanto para a troca de dados entre agentes e gerenciadores, quanto para a transmissão pela Internet. Entretanto, até o momento, a família de normas 11073 não prevê métodos que garantem a segurança. Ela assume que essa proteção é garantida por outras tecnologias.

Quatro princípios centrais regem a segurança da informação em DPS: confidencialidade, integridade, disponibilidade e repúdio.

Confidencialidade é definida pela ISO como “assegurar que a informação seja acessível apenas àqueles que possuem autorização”. Dentro do contexto de saúde, uma quebra de confidencialidade pode ocorrer quando uma “escuta” ou vazamento de informação ocorre entre o agente e o gerenciador.

Integridade significa que um dado não pode ser modificado ou apagado sem autorização. Um vírus, por exemplo, pode quebrar a integridade dos dados no sistema de um agente ou gerenciador. Verificar se os dados vieram do remetente certo e não de alguém que pretende se passar pela fonte ou garantir que os dados originais alcancem o destino sem alterações são também questões inerentes à integridade dos dados.

Disponibilidade, em segurança da informação, significa que a informação deve estar disponível quando necessária. Assim, os sistemas que armazenam, processam e protegem e os canais de comunicação usados para acessar os dados devem estar funcionando corretamente e de forma confiável.

Repúdio, neste contexto, significa ter clareza de como o processo de obtenção dos dados foi realizado. Por exemplo, em um hospital, ter conhecimento da enfermeira que realizou uma medição e qual aparelho foi utilizado, é de suma importância, portanto, todo esse processo deve ser registrado.

Garantir a segurança física dos aparelhos é outro ponto crítico quando se trata de aparelhos para a saúde. Agentes podem ser roubados e trocados por outros, os quais po-

dem fornecer dados errôneos para a decisão médica. Outros problemas, como canal não confinado (conexão sem fio entre agentes e gerenciadores), uso indevido dos gerenciadores (pessoas não autorizadas acessam informações nos *smartphones* ou *desktops*) e a não proteção dos dados nos centros especializados, são outras questões críticas de segurança da informação na saúde.

4.5. Desafios e Perspectivas

As próximas subseções tratam dos principais desafios para o desenvolvimento de WBANs, que estão relacionados, principalmente, a questões de projeto da camada MAC, propagação do sinal, minimização do consumo de energia e coexistência com outras redes operando na mesma faixa de frequência. Ao final, prospecções de estudos futuros são apresentadas.

4.5.1. Desafios Relacionados ao Projeto da Camada MAC

O padrão IEEE 802.15.6 define o mecanismo de acesso ao meio e os requisitos básicos para a interoperabilidade entre dispositivos que operam em WBANs. No entanto, muitos problemas relacionados à camada MAC permanecem ainda sem solução padronizada. Um desses problemas está relacionado à mobilidade do corpo, que pode ocasionar alterações na topologia e densidade da rede. Além disso, o protocolo MAC deve suportar várias redes WBAN operando simultaneamente em diferentes aplicações.

A confiabilidade na entrega dos dados também é um dos requisitos mais importantes. Tendo esta questão em vista, o padrão permite o uso de algumas técnicas para minimizar a interferência como, por exemplo, o salto de frequência dinâmico e a transmissão de *beacon* com intervalos variados conhecidos para cada período. Além disso, permite o uso de retransmissores em cenários nos quais a confiabilidade não é possível através de uma topologia de um salto [Boulis et al. 2012].

Outra preocupação está relacionada à eficiência energética do protocolo MAC. Um dos principais desafios é satisfazer os requisitos de vazão e atraso, que podem variar no tempo, para diferentes tipos de aplicações. Outro desafio é o fornecimento de sincronização do ciclo de trabalho (*duty cycle*) de sensores com diferentes requisitos de tráfego e consumo de energia. A Subseção 4.5.3 abordará essa questão em detalhes.

A provisão de QoS (*Quality of Service*) pela camada MAC também é um dos desafios atuais. O objetivo é permitir que aplicações que trabalham com altas taxas de amostragem transmitam dados conforme necessário ou com um atraso máximo limitado. Desta forma, são necessários mecanismos eficientes de confirmação de entrega (*Acknowledgements*), retransmissão, detecção e correção de erros. Exemplos de aplicações que exigem QoS são as de emergência, que necessitam transmitir dados críticos para a sobrevivência. As soluções de QoS devem ser de baixa complexidade e escaláveis, e também devem prover suporte a diferentes demandas por parte das aplicações. Além disso, devem suportar dispositivos *plug and play* e fornecer conectividade sem interrupção, incluindo a migração entre redes diferentes (*handoff* ou *roaming*). Alguns exemplos de requisitos para aplicações em tempo real, como as de emergência ou de alarmes, são taxas de erro de bit entre 10^{-10} e 10^{-13} e; latência entre $10ms - 250ms$ [Hanson et al. 2009].

4.5.2. Desafios Relacionados ao Meio de Transmissão

Tendo em vista que a comunicação entre dispositivos WBAN deve ocorrer dentro ou nos arredores do corpo humano, um conhecimento profundo sobre estes meios de transmissão e propagação de sinais é necessário para que o desempenho dos protocolos desenvolvidos seja previsto e aprimorado. Os possíveis canais de comunicação podem envolver a transmissão entre os dispositivos localizados dentro, sobre e fora do corpo.

O corpo humano representa um ambiente de propagação complexo para sinais eletromagnéticos por possuir tecidos com diferentes propriedades elétricas e estrutura móvel complexa. Diversos trabalhos encontrados na literatura caracterizam o canal de comunicação WBAN de acordo com diferentes configurações, como a posição dos dispositivos no corpo, a banda de operação da WBAN, e diferentes condições de propagação ocasionadas pela movimentação do corpo e do ambiente ao seu redor.

A caracterização do canal pode ser realizada através do uso de diferentes metodologias. Uma delas é a descrição teórica do fenômeno de propagação eletromagnética do sinal utilizando-se modelos acurados. O objetivo da modelagem é descrever, com detalhes, aspectos específicos da propagação, considerando a influência da estrutura corporal e do padrão de irradiação da antena utilizada.

Em certos casos, como na comunicação sobre o corpo, os objetos presentes no entorno do corpo também deverão ser considerados na modelagem, tendo em vista que o sinal pode ser espalhado e/ou refletido por eles. Desta forma, a caracterização do canal pode ser dividida em duas partes: 1) a parte relativa ao corpo humano em si e; 2) a parte relativa ao ambiente em seu entorno. Entretanto, considerar detalhes profundos do ambiente não é computacionalmente viável. Para superar esta questão, os autores em [Nechayev and Hall 2008] propõem a utilização do modelo de traçado de raios (*ray-tracing model*), que é amplamente utilizado para modelagem de ambientes *indoor*.

A caracterização do canal também pode ser realizada através da obtenção de dados empíricos e tratamento estatístico para elaboração de modelos. Entretanto, para uma caracterização acurada, dados devem ser obtidos considerando-se diferentes fontes de variabilidade do sinal, como diferentes formatos de corpo, ambientes, posição dos dispositivos, e movimentação humana. Os autores em [D'Errico and Ouvry 2010] demonstram que a localização dos nós em conjunto com a movimentação do corpo apresentam impacto forte nas características do canal. Por exemplo, conforme uma pessoa caminha, caso os sensores estejam localizados nos braços, o corpo poderá obstruir a comunicação em determinados momentos devido a sua movimentação, ocasionando uma variação lenta e periódica no sinal.

O trabalho de [Hämäläinen et al. 2011] relata que a propagação também é influenciada pela idade, sexo e implantes de cada pessoa. Além desta variação, existe o desvanecimento rápido (*fast-fading*), que é ocasionado pela propagação multicaminho do sinal difratado e refletido pelo corpo e pelo ambiente. Em [Cavallari et al. 2012], os autores alertam que esta variabilidade do canal afeta fortemente o desempenho de uma rede IEEE 802.15.4. Os resultados obtidos empiricamente foram compatíveis com os obtidos a partir de simulações do canal apresentadas em [Buratti et al. 2011] e [Rosini et al. 2012]. Desta forma, é importante que o desenvolvimento e avaliação de protocolos MAC e de

roteamento sejam realizados considerando-se uma caracterização acurada do canal para que resultados realísticos possam ser obtidos.

O desenvolvimento da antena a ser utilizada também é um desafio devido a certas limitações de formato, tamanho e tipo de material. As restrições de formato e tamanho são relativas ao local do corpo no qual o sensor será instalado ou vestido. Por exemplo, é interessante que o nó possa ser instalado ou substituído em certos locais do corpo sem a necessidade de cirurgias. Desta forma, o caminho percorrido para levar o nó até sua posição dentro do corpo, além de sua posição final, irão ditar suas medidas. Além de medidas limitadas, o material utilizado para a confecção do dispositivo deverá ser biocompatível e não corrosivo, como o titânio ou a platina. Antenas construídas com esses materiais apresentam padrões de irradiação diferentes das construídas comumente com cobre. Os dispositivos também deverão ser resistentes aos padrões de movimentação do corpo para que não sejam danificados.

4.5.3. Desafios Relacionados ao Consumo de Energia

Os dispositivos WBAN poderão ser instalados dentro do corpo, tornando-se de difícil acesso para a realização de processos de manutenção, como a troca ou recarga da bateria. Tendo em vista que a manutenção pode exigir a realização de cirurgia, é interessante que seja realizada com baixa frequência. Portanto, é necessário que a vida útil da bateria de um dispositivo WBAN seja a mais longa possível.

Conforme relata a literatura, diversas são as fontes que contribuem para o consumo ineficiente da energia. Algumas delas são: colisões, recebimento de quadros que não são úteis para o nó em questão e aguardar pelo recebimento de quadros com o rádio ligado quando o canal está ocioso. Estas fontes são comuns quando o mecanismo de controle de acesso ao meio utilizado é baseado em contenção, como o CSMA/CA. Porém, podem ser desconsideradas caso opte-se pela utilização de gerenciamento centralizado para envio de tráfego, como o TDMA. Entretanto, este último possui a desvantagem de necessitar de sincronização periódica entre nós, o que novamente ocasiona consumo energético.

Os padrões IEEE 802.15.6 e 802.15.4 apresentam diferentes mecanismos de acesso ao meio e, portanto, o consumo de energia também é diferenciado. Devido ao fato de o sensoriamento no 802.15.6 ser sempre realizado antes de o contador de *backoff* ser decrementado, este padrão apresenta maior consumo energético em relação ao 802.15.4, no qual a fase de sensoriamento dura apenas dois períodos de *backoff* quando o contador chega ao valor zero. Entretanto, no padrão mais recente, a probabilidade de sucesso de transmissão de um pacote é maior em relação à encontrada no padrão anterior porque os dispositivos possuem um conhecimento mais profundo sobre o estado do canal. Em termos de consumo de energia, o padrão IEEE802.15.6 *Slotted Aloha* é considerado preferível porque não utiliza fase de escuta ao meio. Entretanto, apresenta maior probabilidade de colisão. Este compromisso deve ser avaliado e levado em consideração no decorrer do projeto da camada MAC [Cavallari et al. 2014].

O problema do consumo de energia pode ser superado através do desenvolvimento de camadas PHY e MAC energeticamente eficientes. Uma das abordagens para o problema é reduzir o ciclo de trabalho (*duty cycle*) do rádio. Uma solução estudada é a utilização do *Low Power Listening* (LPL), também conhecido por *Preamble Sampling*. Nesta

técnica, os dispositivos economizam energia ao alternar o estado do rádio entre ligado e desligado. Os nós que não desejam transmitir dados devem acordar de forma assíncrona com determinada periodicidade para verificar se existem dados sendo transmitidos para ele. Caso não exista, eles voltam a dormir. Os nós que desejam transmitir, devem verificar se o meio está vazio e a seguir enviar um preâmbulo. Foi verificado [Buettner et al. 2006] que o envio de diversos preâmbulos pequenos gera maior economia de energia em relação ao envio de apenas um preâmbulo longo. Entre cada preâmbulo curto, existe um intervalo para que ACKs sejam transmitidos. Estes preâmbulos são enviados por, pelo menos, um ciclo de sono para que todos os nós possam acordar e receber pelo menos um deles. Após o envio dos preâmbulos, os dados são enviados. Apenas os nós listados como destino e que receberem o preâmbulo deverão permanecer acordados para receber os dados. Em [Van Dam and Langendoen 2003], os autores conseguiram uma economia de energia de até 98% utilizando esta técnica para aplicações que não demandam atrasos baixos nem altas taxas de tráfego como, por exemplo, alarmes de emergência. Já para aplicações com demanda de menor atraso, como *streaming* de áudio, a economia de energia decai significativamente e a sobrecarga aumenta devido ao envio de preâmbulos.

Outra opção para a otimização do consumo de energia é o uso da técnica de codificação de rede [Movassaghi et al. 2013c], na qual as mensagens que chegam em um retransmissor são combinadas em uma única mensagem enviada em um único *slot* de tempo, reduzindo o número de transmissões por nó.

4.5.4. Desafios Relacionados à Coexistência de WBANS

Uma das bandas de frequências nas quais WBANS operam é a banda industrial, científica e médica (ISM, do inglês *Industrial, Scientific and Medical*). Esta banda é compartilhada por várias tecnologias, como IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*) e IEEE 802.15.4 (*ZigBee*). Por coexistirem na mesma faixa de frequência, essas tecnologias podem causar interferência entre si, afetando as WBANS. Por isso, é importante que soluções que garantam a coexistência das WBANS com estas outras tecnologias sejam utilizadas. Este problema necessita de investigação mais profunda pela comunidade científica, tendo em vista que os padrões citados não incorporaram soluções especificamente voltadas para tal. Redes como as IEEE 802.11, por operarem com potência mais elevada em relação a WBANS e serem amplamente empregadas, devem ser foco de avaliação da coexistência.

Trabalhos como o de [Francisco et al. 2009] e [Chen and Pomalaza-Ráez 2009] relatam o aumento da taxa de perda de pacotes em redes IEEE 802.15.4 na presença de redes IEEE 802.11. Os ambientes avaliados experimentalmente incluem um quarto em um hospital e outro em um apartamento. Em [Huo et al. 2009], os autores verificam o impacto do uso de um forno de microondas e concluem que a interferência é negligenciável para distâncias superiores a 2 metros.

Em [Hernandez and Miura 2012] os autores avaliam a coexistência de WBANS IEEE 802.15.6 e IEEE 802.15.4a em UWB e mostram que a taxa de erro de bits de uma rede 802.15.6 não é afetada pela coexistência com outra rede da mesma tecnologia, ou uma rede 802.15.4a, caso o nível de sinal do tráfego desejado esteja acima de -30 dBm. Em caso contrário, uma degradação severa da qualidade da comunicação pode ser notada.

Em [Torabi and Leung 2012], é apresentada uma proposta com abordagem baseada na centralização do mecanismo de acesso ao meio que emprega sensoriamento cognitivo do espectro. Resultados mostram uma vazão quatro vezes melhor para redes 802.15.4 na presença de redes 802.11. O padrão Bluetooth LE é tido como o mais cooperativo na banda ISM de 2.4GHz por utilizar a técnica de salto em frequências. Esta técnica foi adotada também em novas versões dos padrões 802.15.4 (a 802.15.4e) para aprimorar a robustez na rede na presença de interferência.

4.5.4.1. Rádio Cognitivo em WBANs

A tecnologia de rádio cognitivo (CR, do inglês *Cognitive Radio*) pode ser implementada em WBANs para reduzir a interferência causada pela coexistência, além de ocasionar o uso mais flexível e eficiente do espectro radioelétrico, já que permite que usuários não licenciados (SU, do inglês *Secondary Users*) acessem o espectro de rádio desde que não ocasionem interferência prejudicial aos usuários licenciados (PU, do inglês *Primary Users*). Isso é possível porque rádios cognitivos, inteligentemente, adaptam seus parâmetros de rádio de acordo com critérios de aprendizado predefinidos, selecionando a melhor frequência para operação e as configurações de transmissão. As principais funções de CR, que são realizadas pelas camadas PHY e MAC, são detecção de espectro, acesso ao espectro e compartilhamento de espectro.

As WBANs habilitadas com CR, conhecidas como CRWBAN (do inglês *Cognitive Radio Wireles Body Area Network*), apresentam os seguintes desafios: (1) Acesso ao espectro buscando evitar que os SUs ocasionem colisões e interferência aos PUs. (2) Eficiência energética buscando reduzir o desperdício de energia ocasionado, principalmente, por colisões, *overhearing*, sobrecarga de pacotes, flutuação de tráfego e escuta ociosa. (3) Detecção oportunista por parte dos SUs, que deverão supervisionar o espectro sempre que possível, mantendo uma lista de canais vazios. (4) Decisão otimizada de uso do espectro, que deverá ser tomada a partir de dados obtidos utilizando-se tempo e energia mínimos. Várias técnicas e métodos podem ser aplicados para os processos de aprendizagem e tomada de decisão, dentre eles: a computação evolutiva; a lógica difusa; e o processo de decisão de Markov. (5) Desenho *Cross-Layer*, onde a detecção do espectro é realizada pelas camadas PHY e MAC, mas a gestão do espectro (como a tomada de decisão do espectro, o agendamento e a alocação do canal) pode estar relacionada a todas as outras camadas de rede. Portanto, diferentes camadas da pilha de protocolos devem ser coordenadas [Bhandari and Moh 2015].

Outros desafios relacionados à implementação de CR em WBAN, que também estão estritamente relacionados aos desafios próprios de WBAN são segurança, privacidade, consumo de energia e QoS. Segundo [Bhandari and Moh 2015], os desafios mais importantes a serem abordados são: (1) Implementação de CR - Implementar capacidades cognitivas (aprender, detectar e adaptar) nos nós sensores vai incorrer em maior consumo de energia. Também, os usuários secundários devem alternar suas respectivas frequências de canais e potências de transmissão de acordo com o tipo de rede operacional. É necessário se determinar um ponto adequado na relação custo-benefício na implementação CRWBAN. É viável uma arquitetura na qual a CR esteja implementada somente no nó co-

letor (*sink*), que apresenta menos restrições energéticas. (2) Consumo de energia - Como já é conhecido que os sensores CRWBAN são dispositivos com restrição de energia, além da energia necessária para operações de rede normais (como descoberta de rotas, transmissão/recepção de pacotes de dados e processamento de dados), esses sensores também precisam de energia para detecção de espectro, negociação de canal e frequente transferência de espectro. (3) Melhorar a QoS - O suporte à QoS é uma questão desafiadora devido às restrições de recursos das CRWBAN. Embora os requisitos de QoS variem de acordo com a aplicação e o ambiente operacional, é necessário garantir sempre. Outro desafio em CRWBAN é proteger os direitos dos PUs, pois a comunicação dos PUs deve ser livre de interferências de SUs.

4.5.4.2. Protocolos MAC para CRWBAN

Na literatura, podem ser encontradas várias propostas de protocolos MAC para CRWBANs. O trabalho de [Bhandari and Moh 2015] apresenta alguns protocolos que consideram o uso de CR em WBAN.

No protocolo CR-MAC apresentado em [Ali et al. 2010], as informações de saúde são classificadas em críticas, moderadamente urgentes e não críticas, para isso utilizam-se respectivamente três níveis de potência de transmissão P1, P2 e P3, onde $P1 < P2 < P3$. O tráfego crítico tem a maior prioridade, e o tráfego moderadamente urgente tem o segundo maior. CR-MAC tem a vantagem de que garante QoS para cada tipo de informação. Além disso, oferece alto rendimento, baixa taxa de colisão e baixo consumo energético.

No protocolo DCAA-MAC (*Dynamic Channel Adjustable Asynchronous Cognitive Radio MAC*) [Lee et al. 2011], cada nó varre e seleciona um canal com as melhores condições, por exemplo, baixa relação sinal-ruído (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*). Depois cada nó na rede vai dormir e acorda periodicamente e de forma independente. Um nó primeiro envia um preâmbulo; então, depois de receber a mensagem de confirmação (ACK - *Acknowledgement*) do nó de destino, ele envia os pacotes de dados. No lado do receptor, o receptor detecta o preâmbulo e permanece despertado para receber os dados. Uma vez que a transmissão esteja completa, os nós remetente e receptor passam para o modo de suspensão. Se o nó detecta interferência (ruído ou um PU) em seu canal, ele muda para outro canal disponível para comunicação efetiva. Este protocolo tem uma capacidade de comutação de canal rápida, graças a isso, oferece baixa latência, eficiência energética, e não precisa de sincronização das WBANs. Além disso, provê proteção de PUs e QoS.

C-RICER (*Cognitive-Receiver Initiated Cycled Receiver*) [Nhan et al. 2014] é um protocolo projetado para WBAN em ambientes de alta interferência. O C-RICER ajusta a frequência do canal e a potência de transmissão para reduzir a interferência e o consumo de energia. O objetivo principal da aplicação de CR é manter o SNR para troca de dados e superar as desvantagens da alta interferência coexistente em WBAN. Para reduzir a energia de detecção, o coordenador do C-RICER detecta periodicamente interferência apenas no canal de trabalho. Com este protocolo, alcança-se baixa taxa de colisão e baixo consumo energético.

4.5.5. Perspectivas para o Futuro

Com relação ao problema de modelagem de canal nas WBANs, há uma necessidade de estudos mais aprofundados envolvendo cenários fora do corpo e B2B (*Body-to-Body*), que não possuem um modelo amplamente aceito. No cenário B2B, a comunicação ocorre entre os nós do corpo localizados em diferentes sujeitos humanos. Dada a dificuldade de se realizar testes experimentais comparativos, a criação de um ambiente de testes aberto à comunidade científica é essencial para que as soluções sejam testadas e comparadas.

Em relação ao uso de antenas, para melhor avaliação da propagação do sinal, trabalhos futuros devem fornecer resultados incluindo e excluindo os efeitos dos padrões de radiação da antena utilizada.

Em relação à topologia da rede, considerando-se a tendência para a criação de SoCs (*System on a Chip*) cada vez menores e mais eficientes em termos energéticos, espera-se que as WBANs sejam compostas por centenas de nós. Neste cenário, o uso de topologias com múltiplos saltos torna-se interessante, trazendo a necessidade do desenvolvimento de protocolos de roteamento específicos para essas redes.

Em relação à propagação dentro e fora do corpo humano, o uso de redes híbridas moleculares/RF [Akyildiz et al. 2008] é promissor para o futuro das WBANs. Apesar de a tecnologia estar ainda em um estágio inicial de desenvolvimento, por ela apresentar muitos benefícios, espera-se que seja desenvolvida rapidamente.

4.6. Considerações Finais

WBAN é uma tecnologia promissora que permite o desenvolvimento de novas aplicações relacionadas à saúde podendo mudar nosso estilo de vida em um futuro próximo. Desenvolvimento e padronização nessa área devem ser guiados por pesquisas sólidas, uma vez que esse tipo de rede interage diretamente com o corpo humano.

Este trabalho apresentou uma visão geral de WBANs, discutindo diversos exemplos de sensores e atuadores que podem se comportar como nós da rede. Os requisitos de comunicação em termos de taxa de bits, atraso e taxa de erros foram apresentados. Além disso, questões importantes relacionadas à saúde humana e segurança foram comentadas.

Padrões e soluções para comunicação em WBANs foram endereçados, realçando uma série de propostas encontradas na literatura, incluindo o padrão emergente IEEE 802.15.6. A família de normas IEEE 11073 também foi apresentada, pois especifica padrões para o desenvolvimento de dispositivos pessoais de saúde, que devem ser interoperáveis com sensores e atuadores que compõem as WBANs.

Desafios de pesquisa e perspectivas futuras também foram apontadas, mostrando que WBAN é um tópico promissor para trabalhos futuros na área de computação e telecomunicações.

Referências

- [Akyildiz et al. 2008] Akyildiz, I. F., Brunetti, F., and Blázquez, C. (2008). Nanonetworks: A new communication paradigm. *Computer Networks*, 52(12):2260 – 2279.
- [Al Ameen et al. 2011] Al Ameen, M., Liu, J., Ullah, S., and Kwak, K. S. (2011). A power efficient mac protocol for implant device communication in wireless body area networks. In *IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 1155–1160. IEEE.
- [Al-Fuqaha et al. 2015] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., and Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):2347–2376.
- [Ali et al. 2010] Ali, K. A., Sarker, J. H., and Mouftah, H. T. (2010). A mac protocol for cognitive wireless body area sensor networking. In *Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pages 168–172. ACM.
- [Allen et al. 2005] Allen, B., Brown, A., Schwieger, K., Zimmermann, E., Malik, W. Q., Edwards, D. J., Ouvry, L., and Oppermann, I. (2005). Ultra wideband: Applications, technology and future perspectives. In *International Workshop on Convergent Technologies (IWCT)*.
- [Asogwa et al. 2012] Asogwa, C. O., Zhang, X., Xiao, D., and Hamed, A. (2012). Experimental analysis of AODV, DSR and DSDV protocols based on wireless body area network. In *Internet of Things*, pages 183–191. Springer.
- [Baan et al. 2011] Baan, R., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., Guha, N., Islami, F., Galichet, L., and Straif, K. (2011). Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields. *The Lancet Oncology*, 12(7):624–626.
- [Bae et al. 2012] Bae, J., Cho, H., Song, K., Lee, H., and Yoo, H.-J. (2012). The signal transmission mechanism on the surface of human body for body channel communication. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(3):582–593.
- [Bag and Bassiouni 2007] Bag, A. and Bassiouni, M. A. (2007). Hotspot preventing routing algorithm for delay-sensitive biomedical sensor networks. In *IEEE International Conference on Portable Information Devices*, pages 1–5. IEEE.
- [Bhandari and Moh 2015] Bhandari, S. and Moh, S. (2015). A survey of MAC protocols for cognitive radio body area networks. *Sensors*, 15(4):9189–9209.
- [Bhandari and Moh 2016] Bhandari, S. and Moh, S. (2016). A priority-based adaptive MAC protocol for wireless body area networks. *Sensors*, 16(3):401.
- [Bhanumathi and Sangeetha 2017] Bhanumathi, V. and Sangeetha, C. (2017). A guide for the selection of routing protocols in wban for healthcare applications. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 7(1):24.
- [Bianchi 2000] Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3):535–547.
- [Boulis et al. 2011] Boulis, A. et al. (2011). Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks. *NICTA: National ICT Australia*.
- [Boulis et al. 2012] Boulis, A., Smith, D., Miniutti, D., Libman, L., and Tselishchev, Y. (2012). Challenges in body area networks for healthcare: the mac. *IEEE Communications Magazine*, 50(5):100–106.
- [Buettner et al. 2006] Buettner, M., Yee, G. V., Anderson, E., and Han, R. (2006). X-mac: A short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In *International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 307–320.
- [Buratti et al. 2011] Buratti, C., D’Errico, R., Maman, M., Martelli, F., Rosini, R., and Verdone, R. (2011). Design of a body area network for medical applications: the wisurban project. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies*, page 164. ACM.
- [Cavallari et al. 2012] Cavallari, R., Guidotti, E., Buratti, C., and Verdone, R. (2012). Experimental characterisation of data aggregation in BANs with a walking subject. In *Proceedings of the 7th International Conference on Body Area Networks*, pages 191–194. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- [Cavallari et al. 2014] Cavallari, R., Martelli, F., Rosini, R., Buratti, C., and Verdone, R. (2014). A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3):1635–1657.

- [Chen and Pomalaza-Ráez 2009] Chen, C. and Pomalaza-Ráez, C. (2009). Design and evaluation of a wireless body sensor system for smart home health monitoring. In *IEEE Global Telecommunications Conference, (GLOBECOM)*, pages 1–6. IEEE.
- [Cheshire and Krochmal 2013] Cheshire, S. and Krochmal, M. (2013). DNS-based service discovery. Technical report.
- [Culpepper et al. 2004] Culpepper, B. J., Dung, L., and Moh, M. (2004). Design and analysis of hybrid indirect transmissions (hit) for data gathering in wireless micro sensor networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 8(1):61–83.
- [David et al. 2013] David, L., Vasconcelos, R., Alves, L., André, R., and Endler, M. (2013). A DDS-based middleware for scalable tracking, communication and collaboration of mobile nodes. *Journal of Internet Services and Applications*, 4(1):1.
- [D’Errico and Ouvry 2010] D’Errico, R. and Ouvry, L. (2010). A statistical model for on-body dynamic channels. *International Journal of Wireless Information Networks*, 17(3-4):92–104.
- [Dixon et al. 2012] Dixon, A. M., Allstot, E. G., Gangopadhyay, D., and Allstot, D. J. (2012). Compressed sensing system considerations for ecg and emg wireless biosensors. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 6(2):156–166.
- [Donoho 2006] Donoho, D. L. (2006). Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(4):1289–1306.
- [Effatparvar et al. 2016] Effatparvar, M., Dehghan, M., and Rahmani, A. M. (2016). A comprehensive survey of energy-aware routing protocols in wireless body area sensor networks. *Journal of Medical Systems*, 40(9):201.
- [Ferreira et al. 2017a] Ferreira, V. C., Muchalut-Saade, D. C., and Albuquerque, C. V. (2017a). Estudo sobre estabilidade de rotas em redes corporais sem fio. In *Escola Regional de Computação Aplicada à Saúde (ERCAS)*.
- [Ferreira et al. 2017b] Ferreira, V. C., Seixas, F. L., Muchalut-Saade, D. C., and Albuquerque, C. V. N. (2017b). Análise do protocolo AODV para roteamento em wireless body area networks. In *VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*.
- [Francisco et al. 2009] Francisco, R., Huang, L., and Dolmans, G. (2009). Coexistence of wban and wlan in medical environments. In *IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall (VTC’09)*, pages 1–5. IEEE.
- [Galluccio et al. 2012] Galluccio, L., Melodia, T., Palazzo, S., and Santagati, G. E. (2012). Challenges and implications of using ultrasonic communications in intra-body area networks. In *9th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, pages 182–189. IEEE.
- [Hämäläinen et al. 2011] Hämäläinen, M., Taparugssanagorn, A., and Iinatti, J. (2011). On the wban radio channel modelling for medical applications. In *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pages 2967–2971. IEEE.
- [Hanson et al. 2009] Hanson, M. A., Powell Jr, H. C., Barth, A. T., Ringgenberg, K., Calhoun, B. H., Aylor, J. H., and Lach, J. (2009). Body area sensor networks: Challenges and opportunities. *IEEE Computer*, 42(1).
- [Hao and Foster 2008] Hao, Y. and Foster, R. (2008). Wireless body sensor networks for health-monitoring applications. *Physiological Measurement*, 29(11):R27.
- [Hayajneh et al. 2014] Hayajneh, T., Almashaqbeh, G., Ullah, S., and Vasilakos, A. V. (2014). A survey of wireless technologies coexistence in wban: analysis and open research issues. *Wireless Networks*, 20(8):2165–2199.
- [He et al. 2015] He, P., Li, X., Yan, L., Yang, S., and Zhang, B. (2015). Performance analysis of WBAN based on AODV and DSDV routing protocols. In *2nd International Symposium on Future Information and Communication Technologies for Ubiquitous HealthCare (Ubi-HealthTech)*, pages 1–4. IEEE.
- [Heaney et al. 2011] Heaney, S. F., Scanlon, W. G., Garcia-Palacios, E., Cotton, S. L., and McKernan, A. (2011). Characterization of inter-body interference in context aware body area networking (caban). In *IEEE GLOBECOM*, pages 586–590. IEEE.
- [Heinzelman et al. 2000] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H. (2000). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 10–pp. IEEE.

- [Hernandez and Miura 2012] Hernandez, M. and Miura, R. (2012). Coexistence of IEEE Std 802.15.6tm-2012 UWB-phy with other UWB systems. In *IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, pages 46–50.
- [Hoang et al. 2009] Hoang, D. C., Tan, Y. K., Chng, H. B., and Panda, S. K. (2009). Thermal energy harvesting from human warmth for wireless body area network in medical healthcare system. In *International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pages 1277–1282. IEEE.
- [Hunkeler et al. 2008] Hunkeler, U., Truong, H. L., and Stanford-Clark, A. (2008). MQTT-S: A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks. In *3rd international conference on communication systems software and middleware and workshops (Comsware 2008)*, pages 791–798. IEEE.
- [Huo et al. 2009] Huo, H., Xu, Y., Bilen, C. C., and Zhang, H. (2009). Coexistence issues of 2.4 GHz sensor networks with other RF devices at home. In *Third International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM'09)*, pages 200–205. IEEE.
- [ICNIRP 2009] ICNIRP (2009). International commission on non-ionizing radiation protection (ICNIRP) statement on the guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 97(3):257–258.
- [IEEE Std 11073-00103 2012] IEEE Std 11073-00103 (2012). Health informatics - personal health device communication: Overview. Standard, ISO/IEEE, New York, USA.
- [IEEE Std 11073-20101 2004] IEEE Std 11073-20101 (2004). Health informatics-point-of-care medical device communication - part 20101: Application profile-base standard. Standard, ISO/IEEE, New York, USA.
- [IEEE Std 11073-20601 2010] IEEE Std 11073-20601 (2010). Health informatics - personal health device communication - application profile: Optimized exchange protocol. Standard, ISO/IEEE, New York, USA.
- [IEEE Std 802.15.4 2006a] IEEE Std 802.15.4 (2006a). 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)*, pages 1–320.
- [IEEE Std 802.15.4 2006b] IEEE Std 802.15.4 (2006b). IEEE standard for local and metropolitan area networks - part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low rate wireless personal area networks (WPANs). Standard, Institute of Electrical and Electronic Engineers.
- [IEEE Std 802.15.6 2012] IEEE Std 802.15.6 (2012). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks. Standard, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, USA.
- [Javaid et al. 2013] Javaid, N., Hayat, S., Shakir, M., Khan, M. A., Bouk, S. H., and Khan, Z. (2013). Energy efficient MAC protocols in wireless body area sensor networks-a survey. *arXiv preprint arXiv:1303.2072*.
- [Johnson et al. 2007] Johnson, D., Hu, Y., and Maltz, D. (2007). RFC 4728: The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4, feb. 2007. Technical report.
- [Khan et al. 2012a] Khan, Z., Aslam, N., Sivakumar, S., and Phillips, W. (2012a). Energy-aware peering routing protocol for indoor hospital body area network communication. *Procedia Computer Science*, 10:188–196.
- [Khan et al. 2012b] Khan, Z., Sivakumar, S., Phillips, W., and Robertson, B. (2012b). QPRD: QoS-aware peering routing protocol for delay sensitive data in hospital body area network communication. In *Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2012 Seventh International Conference on*, pages 178–185. IEEE.
- [Khan et al. 2013] Khan, Z. A., Sivakumar, S., Phillips, W., and Robertson, B. (2013). A QoS-aware routing protocol for reliability sensitive data in hospital body area networks. *Procedia Computer Science*, 19:171–179.
- [Kirti 2016] Kirti, T. M. (2016). Survey of IEEE 802.15 task work group. *International Journal of Engineering Science*, 2077.
- [Kumari and Nand 2016] Kumari, R. and Nand, P. (2016). Performance comparison of various routing protocols in WSN and WBAN. In *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, pages 427–431. IEEE.

- [Latré et al. 2011] Latré, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., and Demeester, P. (2011). A survey on wireless body area networks. *Wireless Networks*, 17(1):1–18.
- [Latré et al. 2007] Latré, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., Reusens, E., Joseph, W., and Demeester, P. (2007). A low-delay protocol for multihop wireless body area networks. In *Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services, 2007. MobiQuitous 2007. Fourth Annual International Conference on*, pages 1–8. IEEE.
- [Lee et al. 2011] Lee, B., Yun, J., and Han, K. (2011). Dynamic channel adjustable asynchronous cognitive radio mac protocol for wireless medical body area sensor networks. In *Communication and Networking*, pages 338–345. Springer.
- [Levis et al. 2005] Levis, P., Madden, S., Polastre, J., Szewczyk, R., Whitehouse, K., Woo, A., Gay, D., Hill, J., Welsh, M., Brewer, E., et al. (2005). Tinyos: An operating system for sensor networks. In *Ambient intelligence*, pages 115–148. Springer.
- [Li and Tan 2010] Li, H. and Tan, J. (2010). Heartbeat-driven medium-access control for body sensor networks. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(1):44–51.
- [Lindsey and Raghavendra 2002] Lindsey, S. and Raghavendra, C. S. (2002). Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems. In *IEEE Aerospace Conference, 2002*, volume 3, pages 3–3. IEEE.
- [Marinkovic et al. 2009a] Marinkovic, S., Spagnol, C., and Popovici, E. (2009a). Energy-efficient tdma-based mac protocol for wireless body area networks. In *Third International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM'09)*, pages 604–609. IEEE.
- [Marinkovic et al. 2009b] Marinkovic, S. J., Popovici, E. M., Spagnol, C., Faul, S., and Marnane, W. P. (2009b). Energy-efficient low duty cycle mac protocol for wireless body area networks. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 13(6):915–925.
- [Martins et al. 2014] Martins, A. F., Santos, D. F., Perkusich, A., and Almeida, H. O. (2014). Upnp and iee 11073: Integrating personal health devices in home networks. *2014 IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2014*, pages 1–6.
- [Maskooki et al. 2011] Maskooki, A., Soh, C. B., Gunawan, E., and Low, K. S. (2011). Opportunistic routing for body area network. In *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE*, pages 237–241. IEEE.
- [Monowar and Bajaber 2015] Monowar, M. M. and Bajaber, F. (2015). On designing thermal-aware localized qos routing protocol for in-vivo sensor nodes in wireless body area networks. *Sensors*, 15(6):14016–14044.
- [Movassaghi et al. 2012] Movassaghi, S., Abolhasan, M., and Lipman, J. (2012). Energy efficient thermal and power aware (etpa) routing in body area networks. In *23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1108–1113. IEEE.
- [Movassaghi et al. 2013a] Movassaghi, S., Abolhasan, M., and Lipman, J. (2013a). A review of routing protocols in wireless body area networks. *Journal of Networks*, 8(3):559–575.
- [Movassaghi et al. 2013b] Movassaghi, S., Abolhasan, M., and Lipman, J. (2013b). A review of routing protocols in wireless body area networks. *Journal of Networks*, 8(3):559–575.
- [Movassaghi et al. 2014] Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D., and Jamalipour, A. (2014). Wireless body area networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3):1658–1686.
- [Movassaghi et al. 2013c] Movassaghi, S., Shirvanimoghaddam, M., Abolhasan, M., and Smith, D. (2013c). An energy efficient network coding approach for wireless body area networks. In *IEEE 38th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pages 468–475. IEEE.
- [Nechayev and Hall 2008] Nechayev, Y. I. and Hall, P. S. (2008). Multipath fading of on-body propagation channels. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pages 1–4.
- [Nhan et al. 2014] Nhan, N.-Q., Gautier, M., and Berder, O. (2014). Asynchronous mac protocol for spectrum agility in wireless body area sensor networks. In *9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, pages 203–208. IEEE.
- [Oey and Moh 2013] Oey, C. H. W. and Moh, S. (2013). A survey on temperature-aware routing protocols in wireless body sensor networks. *Sensors*, 13(8):9860–9877.
- [Omeni et al. 2008] Omeni, O., Wong, A. C. W., Burdett, A. J., and Toumazou, C. (2008). Energy efficient medium access protocol for wireless medical body area sensor networks. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2(4):251–259.

- [Pantelopoulos and Bourbakis 2010] Pantelopoulos, A. and Bourbakis, N. G. (2010). A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 40(1):1–12.
- [PCHAlliance 2017] PCHAlliance (2017). Introduction to the continua design guidelines. Standard, Personal Connected Health Alliance.
- [Perkins et al. 2003] Perkins, C., Belding-Royer, E., and Das, S. (2003). Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. Technical report.
- [Perkins and Bhagwat 1994] Perkins, C. E. and Bhagwat, P. (1994). Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. In *ACM SIGCOMM computer communication review*, volume 24, pages 234–244. ACM.
- [Quwaider and Biswas 2009] Quwaider, M. and Biswas, S. (2009). Probabilistic routing in on-body sensor networks with postural disconnections. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobility management and wireless access*, pages 149–158. ACM.
- [Rafatkah and Lighvan 2014] Rafatkah, O. and Lighvan, M. Z. (2014). M2e2: a novel multi-hop routing protocol for wireless body sensor networks. *Int J Comput Netw Commun Secur*, 2(8):260–267.
- [Razaque et al. 2011] Razaque, M. A., Hong, C. S., and Lee, S. (2011). Data-centric multiobjective qos-aware routing protocol for body sensor networks. *Sensors*, 11(1):917–937.
- [Rhee et al. 2004] Rhee, S. H., Chung, K., Kim, Y., Yoon, W., and Chang, K. S. (2004). An application-aware mac scheme for ieee 802.15.3 high-rate wpan. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, volume 2, pages 1018–1023. IEEE.
- [Rodgers et al. 2015] Rodgers, M. M., Pai, V. M., and Conroy, R. S. (2015). Recent advances in wearable sensors for health monitoring. *Sensors*, 15(6):3119–3126.
- [Rosini et al. 2012] Rosini, R., Martelli, F., Maman, M., D’Errico, R., Buratti, C., and Verdone, R. (2012). On-body area networks: from channel measurements to mac layer performance evaluation. In *European Wireless Conference*, pages 1–7.
- [Ruzzelli et al. 2007] Ruzzelli, A. G., Jurdak, R., O’Hare, G. M., and Van Der Stok, P. (2007). Energy-efficient multi-hop medical sensor networking. In *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE international workshop on Systems and networking support for healthcare and assisted living environments*, pages 37–42. ACM.
- [Savci et al. 2005] Savci, H. S., Sula, A., Wang, Z., Dogan, N. S., and Arvas, E. (2005). Mics transceivers: regulatory standards and applications [medical implant communications service]. In *IEEE Southeast-Con*, pages 179–182. IEEE.
- [Seyedi et al. 2013] Seyedi, M., Kibret, B., Lai, D. T., and Faulkner, M. (2013). A survey on intrabody communications for body area network applications. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60(8):2067–2079.
- [SIG 2010] SIG, B. (2010). Specification of the bluetooth system version 4.0. [Online] Available at: <http://www.bluetooth.com>.
- [Sruthi 2016] Sruthi, R. (2016). Medium access control protocols for wireless body area networks: A survey. *Procedia Technology*, 25:621–628.
- [Su and Zhang 2009] Su, H. and Zhang, X. (2009). Battery-dynamics driven tdma mac protocols for wireless body-area monitoring networks in healthcare applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 27(4).
- [Tiwari et al. 2014] Tiwari, R., Shrivastava, S., and Das, S. (2014). Performance analysis of mobile patient network using aodv and dsr routing algorithms. In *Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), 2014 International Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- [Torabi and Leung 2012] Torabi, N. and Leung, V. (2012). Robust access for wireless body area networks in public m-health. In *Proceedings of the 7th International Conference on Body Area Networks*, pages 170–176. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- [Torres et al. 2016] Torres, A. B., Rocha, A. R., and de Souza, J. N. (2016). Análise de desempenho de brokers mqtt em sistema de baixo custo. In *Anais do XXXVI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*.
- [Tselishchev et al. 2010] Tselishchev, Y., Boulis, A., and Libman, L. (2010). Experiences and lessons from implementing a wireless sensor network mac protocol in the castalia simulator. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6. IEEE.

- [Ullah et al. 2012] Ullah, S., Higgins, H., Braem, B., Latre, B., Blondia, C., Moerman, I., Saleem, S., Rahman, Z., and Kwak, K. S. (2012). A comprehensive survey of wireless body area networks. *Journal of Medical Systems*, 36(3):1065–1094.
- [Ullah et al. 2014] Ullah, S., Imran, M., and Alnuem, M. (2014). A hybrid and secure priority-guaranteed mac protocol for wireless body area network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*.
- [Ullah et al. 2009] Ullah, S., Shen, B., Riazul Islam, S., Khan, P., Saleem, S., and Sup Kwak, K. (2009). A study of MAC protocols for WBANs. *Sensors*, 10(1):128–145.
- [Van Dam and Langendoen 2003] Van Dam, T. and Langendoen, K. (2003). An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 171–180. ACM.
- [Von Buren et al. 2006] Von Buren, T., Mitcheson, P. D., Green, T. C., Yeatman, E. M., Holmes, A. S., and Troster, G. (2006). Optimization of inertial micropower generators for human walking motion. *Sensors*, 6(1):28–38.
- [Watteyne et al. 2007] Watteyne, T., Augé-Blum, I., Dohler, M., and Barthel, D. (2007). Anybody: a self-organization protocol for body area networks. In *Proceedings of the ICST 2nd international conference on Body area networks*, page 6. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- [Xu et al. 2014] Xu, S., Zhang, Y., Jia, L., Mathewson, K. E., Jang, K.-I., Kim, J., Fu, H., Huang, X., Chava, P., Wang, R., et al. (2014). Soft microfluidic assemblies of sensors, circuits, and radios for the skin. *Science*, 344(6179):70–74.
- [Yuce and Ho 2008] Yuce, M. R. and Ho, C. K. (2008). Implementation of body area networks based on mics/wmts medical bands for healthcare systems. In *30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS)*, pages 3417–3421. IEEE.
- [Zhang and Dolmans 2009] Zhang, Y. and Dolmans, G. (2009). A new priority-guaranteed mac protocol for emerging body area networks. In *Fifth International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'09)*, pages 140–145. IEEE.
- [Zhen et al. 2008] Zhen, B., Patel, M., Lee, S., Won, E., and Astrin, A. (2008). TG6 technical requirements document (TRD). *IEEE P802.15 Working Group*.