

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

EGBERTO CABALLERO ROSILLO

**PROTOCOLO DE ROTEAMENTO CIENTE DE
QUALIDADE COM PREVENÇÃO DE
AQUECIMENTO PARA REDES CORPORAIS SEM
FIO**

NITERÓI

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

EGBERTO CABALLERO ROSILLO

**PROTOCOLO DE ROTEAMENTO CIENTE DE
QUALIDADE COM PREVENÇÃO DE
AQUECIMENTO PARA REDES CORPORAIS SEM
FIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: SISTEMAS DE COMPUTAÇÃO.

Orientador:

Célio Vinicius Neves de Albuquerque

Co-orientadora:

Débora Christina Muchaluat Saade

NITERÓI

2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

R819p Rosillo, Egberto Caballero
Protocolo de roteamento ciente de qualidade com prevenção de aquecimento para redes corporais sem fio / Egberto Caballero Rosillo ; Célio Vinicius Neves de Albuquerque, orientador ; Débora Christina Muchaluat Saade, coorientadora. Niterói, 2020.
115 f.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PGC.2020.m.08266391190>

1. Redes Corporais sem Fio. 2. WBAN. 3. Padrão IEEE 802.15.6. 4. Roteamento. 5. Produção intelectual. I. Neves de Albuquerque, Célio Vinicius, orientador. II. Muchaluat Saade, Débora Christina, coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Computação. IV. Título.

CDD -

EGBERTO CABALLERO ROSILLO

PROTOCOLO DE ROTEAMENTO CIENTE DE QUALIDADE COM PREVENÇÃO
DE AQUECIMENTO PARA REDES CORPORAIS SEM FIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: SISTEMAS DE COMPUTAÇÃO.

Aprovada em Março de 2020.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque - Orientador, UFF



Prof. Débora Christina Muchaluat Saade - Coorientadora, UFF



Prof. Diego Gimenez Passos, UFF



Prof. Antônio Tadeu Azevedo Gomes, LNCC

Niterói

2020

A Eumelia Mecias Rivero.

Agradecimentos

Gostaria agradecer a todas aquelas pessoas e instituições que possibilitaram e contribuíram na realização deste mestrado em Sistemas de Computação e no desenvolvimento na pesquisa desta dissertação, destacando:

- Ao programa de Pós-Graduação do Instituto de Computação (IC) da Universidade Federal Fluminense (UFF) pela oportunidade de superação profissional, aprendizagem em novas áreas do conhecimento, apreender uma nova língua e vivenciar a cultura brasileira.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento para desenvolver as atividades da pesquisa.
- Ao Instituto de Computação (IC) da UFF e em especial ao Laboratório MídiaCom por toda a infraestrutura fornecida para a pesquisa.
- Aos professores das disciplinas que cursei durante o mestrado, pela excelência no ensino e a transmissão dos conhecimentos.
- A meus orientadores, Célio Vinícius Neves de Albuquerque e Débora Christina Munchalut Saade pela suas orientações certas no desenvolvimento da pesquisa.
- Aos funcionários da pós-graduação Marister Monteiro, Teresa Cancela e Hélio Augusto pela ajuda, cordialidade, disposição e prestatividade em transmitir as informações necessárias.
- Aos colegas e amigos que contribuíram de alguma forma ao término do mestrado, em especial a Ruslan Guerra, Carlos Herrera, José Ramón e Vinicius Ferreira cujas ajudas foram muito importantes.
- A minha família pelo carinho, confiança, compreensão e apoio incondicional.

Resumo

As Redes Corporais Sem Fio (WBAN - *Wireless Body Area Network*) têm a capacidade de monitorar sinais vitais do corpo humano e parâmetros ambientais, coletando e enviando dados usando a comunicação sem fio. Motivados pelos variados benefícios que as WBANs oferecem na área de cuidados de saúde, na última década foi realizado um número considerável de trabalhos para o seu desenvolvimento. Como principal resultado, publicou-se o padrão IEEE 802.15.6. Nesse padrão, são definidas a camada física (PHY) e a camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC) para WBAN.

Porém, aspectos relativos aos protocolos de roteamento para WBAN não são abordados nesse padrão. No padrão WBAN se define a existência de nós sensores/atuadores, neste trabalho denominados como nós sensores, e um nó coordenador. O padrão assume a comunicação direta entre os nós sensores e o nó coordenador. Entretanto, nem sempre o caminho direto apresenta a melhor qualidade. Portanto, adicionalmente o padrão prevê, no máximo, dois saltos na comunicação entre nós sensores e o nó coordenador. Nesse sentido, o uso de um protocolo de roteamento de múltiplos saltos baseado na qualidade dos enlaces pode melhorar o desempenho da taxa de entrega de pacotes da rede.

Outro aspecto de importância em WBAN é evitar o superaquecimento dos nós da rede; pois o aumento excessivo da temperatura pode causar danos nos tecidos do corpo onde é implantado um nó WBAN. Neste trabalho, é proposto o protocolo *Link-Quality Aware and Thermal Aware On-Demand Routing* (LATOR) como uma proposta para o roteamento em WBAN com base na qualidade dos enlaces e com prevenção de superaquecimento dos nós. Inicialmente foi considerada como métrica de qualidade o Indicador de Força de Sinal Recebido (RSSI), mas outras métricas de qualidade podem ser consideradas. Para estimar o aumento da temperatura foi considerado o calor gerado pela radiação das antenas e a potência dissipada pelos componentes eletrônicos dos nós.

A proposta foi implementada e avaliada utilizando o *framework* Castalia no simulador OMNET++. Resultados experimentais mostram que a proposta apresentada permite melhor desempenho na taxa de entrega de pacotes, quando a comunicação direta apresenta baixa qualidade e existe algum outro caminho alternativo com melhor qualidade comparado com a rota direta. Como principal resultado, o LATOR evita o superaquecimento de nós na rede mediante reroteamento e mantendo um adequado desempenho na taxa de entrega de pacotes e latência para aplicações WBAN.

Palavras-chave: Redes Corporais sem Fio, WBAN, IEEE 802.15.6, Roteamento.

Abstract

Wireless Body Area Networks (WBAN) have the ability to monitor vital body signals and environmental parameters by collecting and sending data using wireless communication. Motivated by the various benefits offered by WBAN in the area of healthcare, in the last decade a considerable number of studies for the development of WBAN has been done. The IEEE 802.15.6 standard defines physical and MAC layers for WBANs.

The WBAN standard defines the direct communication between the sensor nodes and the coordinator node. However, the direct link does not always have the best quality. It also supports this communication in up to two hops. In this sense, the use of a routing protocol based on the quality of the links can improve the performance of the Packet Delivery Rate (PDR) of the network. Another important aspect in WBAN is to avoid overheating, because an excessive node temperature rise can cause damage to body tissues close to where a WBAN node is implanted.

In this work, the LATOR protocol is introduced as a proposal for routing in WBAN based on the quality of the links and, most importantly, with overheating prevention. The Received Signal Strength Indicator (RSSI) was considered as a quality metric, but other quality metrics can be also considered. To estimate the increase in temperature, the heat generated by the radiation from the antennas and the power dissipated by the electronic components of the nodes were considered.

The proposal was implemented and evaluated using the Castalia framework over the OMNET++ simulator. Experimental results show that LATOR allows better performance in terms of PDR, when the direct communication presents low quality and there is an alternative path with better quality compared to the direct route. Most importantly, LATOR prevents the overheating of nodes in the network by exploiting rerouting and maintaining adequate performance in the PDR and latency for WBAN applications.

Keywords: Wireless Body Area Networks, WBAN, IEEE 802.15.6, Routing.

Lista de Figuras

2.1	Nós WBAN posicionados no corpo humano [26].	8
2.2	Arquitetura de comunicação de WBANs [35].	10
2.3	Topologias de WBAN [15].	13
2.4	Modelo de Referência IEEE 802.15.6 [15].	13
2.5	Estrutura da unidade de dados da camada física NB-PHY [15].	15
2.6	Estrutura da unidade de dados da camada física UWB-PHY [15].	16
2.7	Estrutura da unidade de dados da camada física HBC-PHY [15].	17
2.8	Formato do quadro MAC [15].	18
2.9	Superquadro MAC em modo <i>beacon</i> com limites de superquadro [47].	18
4.1	Processo de descoberta de rota de LATOR.	38
4.2	Disseminação do RREQ pela rede.	39
4.3	Envio e processamento do RREP.	40
4.4	Desvio do tráfego de dados por aquecimento.	41
4.5	Diagrama de estados do protocolo LATOR.	42
4.6	Diagrama detalhado do bloco processando pacote.	43
5.1	Módulos do Castalia e as suas conexões [6].	65
5.2	Módulo composto para os nós em Castalia [6].	65
5.3	Diagrama conceitual da implementação de LATOR em Castalia	67
5.4	Posição dos nós no corpo	69
5.5	PDR para cada nó transmissor.	73
5.6	Rotas utilizadas pelos protocolos de roteamento	74

5.7	Incremento de temperatura gerado pela taxa de absorção específica e pela potência consumida dos nós.	78
5.8	Comportamento da temperatura dos nós. Nó 3 atuando como transmissor.	79
5.9	PDR quando o nó 3 atua como transmissor.	80
5.10	Distribuição da latência dos pacotes transmitidos pelo nó 3.	81
5.11	Série temporal da latência dos pacotes transmitidos pelo nó 3 utilizando LATOR.	82
5.12	Comportamento da temperatura dos nós. Nó 1 atuando como transmissor.	83
5.13	Comportamento da temperatura dos nós. Nó 4 atuando como transmissor.	84
5.14	Comportamento da temperatura dos nós. Nó 2 atuando como transmissor.	85
5.15	Comportamento da temperatura dos nós. Nó 5 atuando como transmissor.	86
5.16	Comportamento da temperatura com todos os nós transmitindo.	87
5.17	PDR para cada nó transmissor.	88
5.18	Distribuição da latência dos pacotes transmitidos na rede.	88
5.19	Série temporal da latência dos pacotes transmitidos pelo nó 3.	89

Lista de Tabelas

1.1	Mapa de conectividade da rede.	4
2.1	Sensores de bio-sinais utilizados em WBAN.	9
2.2	Requisitos de taxa de dados para aplicações WBANs [13].	11
2.3	Bandas de frequências e tipos de modulação para NB-PHY [15].	14
4.1	Formato da mensagem RREQ.	45
4.2	Formato da mensagem RREP.	46
4.3	Formato da mensagem RERR.	47
4.4	Formato da mensagem HELLO.	48
4.5	Formato da mensagem de dados.	49
5.1	Parâmetros de rádio definidos	70
5.2	Parâmetros MAC definidos	71
5.3	Uso das rotas para cada protocolo de roteamento	74

Lista de Abreviaturas e Siglas

3G	<i>Terceira geração de telefonia móvel</i>
4G	<i>Quarta geração de telefonia móvel</i>
5G	<i>Quinta geração de telefonia móvel</i>
AAL	<i>Ambient Assisted Living</i>
ACK	<i>Acknowledgement</i>
ALTR	<i>Adaptive Least Temperature Routing</i>
AODV	<i>Ad-hoc On Demand Distance Vector</i>
AP	<i>Access Point</i>
BAN	<i>Body Area Network</i>
BCH	<i>Bose–Chaudhuri–Hocquenghem codes</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CAP	<i>Contention Access Phase</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CH	<i>Cluster Head</i>
CICADA	<i>Cascading Information retrieval by Controlling Access with Distributed slot Assignment</i>
CP	<i>Critical Packet</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i>
D8PSK	<i>Differential 8-Phase-Shift Keying</i>

DBPSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>
DMQoS	<i>Data-centric Multi-objective QoS-aware Routing</i>
DP	<i>Delay-Driven Packet</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
DSN	<i>Destination Sequence Number</i>
DSP	<i>Delay Sensitive Packet</i>
EAP	<i>Exclusive Access Phase</i>
ECG	<i>Eletrocardiograma</i>
EEG	<i>Eletroencefalograma</i>
EFC	<i>Electric Field Communication</i>
EMG	<i>Eletromiograma</i>
EPR	<i>Energy-aware Peering Routing</i>
ETPA	<i>Energy Efficient Thermal and Power Aware Routing</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FCFS	<i>First Come First Served</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
HBC	<i>Human Body Communications</i>
HCS	<i>Header Check Sequence</i>
HIT	<i>Hybrid Indirect Transmissions</i>
HME	<i>Hub Management Entity</i>

HPR	<i>Hotspot Preventing Routing</i>
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
ID	<i>Identity</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LAEEBA	<i>Link Aware and Energy Efficient scheme for Body Area networks</i>
LAOR	<i>Link-Quality Aware On-Demand Routing</i>
LATOR	<i>Link-Quality Aware and Thermal Aware On-Demand Routing</i>
LEACH	<i>Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>
LLF	<i>Link Likelihood Factor</i>
LO	<i>Lexicographic Optimization</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
LTR	<i>Least Temperature Routing</i>
LQI	<i>Link Quality Indicator</i>
M²E²	<i>Multi-Mode Energy-Efficient Multihop Protocol</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAP	<i>Managed Access Phase</i>
MIC	<i>Message Integrity Code</i>
MICS	<i>Medical Implant Communication Service</i>
MSDU	<i>MAC Service Data Unit</i>
MPDU	<i>MAC Protocol Data Unit</i>
NB	<i>Narrowband</i>
NED	<i>Network Description</i>
NET	<i>Network</i>
NICTA	<i>National Information and Communications Technology of Australia</i>

NME	<i>Node Management Entity</i>
OP	<i>Ordinary Packet</i>
OSN	<i>Originator Sequence Number</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PDR	<i>Packet Delivery Rate</i>
PEGASIS	<i>Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems</i>
PHR	<i>Physical Layer Header</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PLCP	<i>Physical Layer Convergence Protocol</i>
PPDU	<i>PHY-Layer Protocol Data Unit</i>
PRPLC	<i>Probabilistic Routing with Postural Link Cost</i>
PSDU	<i>Physical Layer Service Data Unit</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPRD	<i>QoS-aware Peering Routing protocol for Delay sensitive data</i>
QPRR	<i>QoS aware Peering Routing protocol for Reliability sensitive data</i>
RACK	<i>Received Acknowledgement</i>
RAP	<i>Random Access Phase</i>
RERR	<i>Route Error</i>
RF	<i>Radiofrequência</i>
RI	<i>Rate Indicator</i>
RP	<i>Reliability-Driven Packet</i>
RREQ	<i>Route Request</i>
RREP	<i>Route Reply</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>

RSP	<i>Reliability Sensitive Packet</i>
RT	<i>Routing Table</i>
RTS	<i>Request To Send</i>
Rx	<i>Receptor</i>
SAP	<i>Service Access Point</i>
SAR	<i>Specific Absorption Rate</i>
SFD	<i>Start Frame Delimiter</i>
SHR	<i>Synchronization Header</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SN	<i>Sequence Number</i>
TARA	<i>Thermal-Aware Routing Algorithm</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TICOSS	<i>TImezone COordinated Sleep Scheduling</i>
TLQoS	<i>Thermal-Aware QoS Routing Protocol</i>
Tx	<i>Transmissor</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
UWB	<i>Ultra Wideband</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WBAN	<i>Wireless Body Area Network</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMTS	<i>Wireless Medical Telemetry Service</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Organização da Dissertação	6
2	Fundamentação Teórica	7
2.1	Redes Corporais Sem Fio	7
2.2	Aplicações Médicas e seus Requisitos	10
2.3	Padrão IEEE 802.15.6	12
2.3.1	Camada Física	14
2.3.2	Camada MAC	17
2.4	Desafios em WBAN	19
2.5	Aquecimento dos nós em WBAN	21
3	Trabalhos Relacionados	24
3.1	Protocolos Baseados em <i>cluster</i>	24
3.2	Protocolos Baseados em Qualidade de Serviço	26
3.3	Protocolos Baseados em Movimentos Corporais	28
3.4	Protocolos Baseados na Temperatura	30
3.5	Protocolos Cross-Layer	33
3.6	Conclusões do capítulo	34
4	Proposta	35
4.1	Protocolo LATOR	35
4.1.1	Descoberta de Rota do Protocolo LATOR	37

4.1.2	Manutenção de Rota e Reroteamento	40
4.1.3	Diagrama de estados do protocolo LATOR	42
4.1.4	Critérios para a seleção de rotas	44
4.2	Formatos das mensagens do protocolo LATOR	44
4.2.1	Mensagem RREQ	44
4.2.2	Mensagem RREP	46
4.2.3	Mensagem RERR	47
4.2.4	Mensagem HELLO	48
4.2.5	Mensagem de Dados	48
4.3	Tabela de Rota do Protocolo LATOR	49
4.4	Geração e Processamento da Mensagem RREQ	51
4.5	Geração e Processamento da Mensagem RREP	54
4.6	Geração e Processamento da Mensagem HELLO	58
4.7	Geração e Processamento da Mensagem RERR	59
4.8	Geração e Processamento da Mensagem DATA	61
5	Implementação e Avaliação	63
5.1	Framework Castalia	63
5.1.1	Estrutura básica	64
5.1.2	Simulação e coleta de resultados	66
5.2	Implementação de LATOR	66
5.3	Cenário WBAN utilizado	68
5.3.1	Canal sem fio	69
5.3.2	Camada Física	70
5.3.3	Camada MAC	70
5.3.4	Aspectos do encaminhamento	71
5.4	Avaliação do protocolo LATOR	72

5.4.1	Análise da seleção de rotas	72
5.4.2	Análise do controle de temperatura	77
6	Conclusão	91
	Referências	94

Capítulo 1

Introdução

Estudos demográficos têm demonstrado que nos últimos anos a população idosa mundial aumentou e é previsto que esse aumento continue ao longo do presente século [18]. A presença de doenças crônicas não transmissíveis como hipertensão, diabetes e doenças cardiovasculares em pessoas idosas é comum [18]. Com isso, os gastos relacionados à saúde e a necessidade de tratá-la de forma preventiva estão e continuarão aumentando em correspondência com o envelhecimento da população mundial. Essa situação, junto com o desenvolvimento alcançado nos últimos anos na microeletrônica e nas telecomunicações motivou a criação de novas tecnologias capazes de prover monitoramento de funções do corpo humano com baixo custo.

As Redes Corporais Sem Fio (*Wireless Body Area Network* (WBAN) - *Wireless Body Area Network*) surgem nesse contexto como uma tecnologia promissora para fornecer monitoramento da saúde de pacientes em tempo real, diagnosticar e tratar doenças que podem ameaçar a vida. Os avanços na eletrônica têm permitido desenvolver sensores biomédicos miniaturizados, que podem ser utilizados para monitorar o funcionamento do corpo humano sem interferir nas atividades cotidianas das pessoas. Adicionalmente, o uso de sensores atuadores ajuda a controlar funções biológicas como no caso de diabetes, hipertensão arterial, arritmia cardíaca entre outros.

As WBANs podem dar suporte para várias aplicações além das aplicações médicas, por exemplo, dentro das áreas de: entretenimento, esporte, jogos e militar. Apesar disso, as aplicações médicas são as que têm recebido maior atenção por parte dos pesquisadores, já que além de serem a principal motivação para o desenvolvimento de WBAN, descrevem cenários nos quais a qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) é crítica, pois lidam com sinais vitais dos pacientes e risco de vida das pessoas. Por isso é importante um bom desempenho das comunicações em WBANs em termos de latência, taxa de transferência,

taxa de pacotes entregues, entre outras métricas.

Como resultado dos trabalhos desenvolvidos com foco em WBAN, no ano 2012, foi publicado o padrão IEEE 802.15.6 [15], onde são definidas, além de questões gerais das WBANs, as funcionalidades e características da camada física (PHY), e da camada de Controle de Acesso ao Meio (*Medium Access Control* (MAC)). Porém, aspectos relativos aos protocolos de roteamento para WBAN não são abordados neste padrão. Isso deixou o caminho livre para que os pesquisadores desenvolvessem vários protocolos específicos para WBAN abordados em [5], tentando sempre atingir um ou vários dos desafios identificados em WBAN.

Em WBAN um aumento de temperatura dos nós de 0,1 °C pode causar danos nos tecidos do corpo onde o nó WBAN é implantado [17]. O aquecimento dos tecidos na vizinhança dos nós implantados favorece a proliferação de bactérias e afeta o metabolismo das células. Por isso, o superaquecimento dos nós resulta um desafio de alta importância a ser enfrentado.

Entre outros desafios relevantes de WBAN, podem-se citar: perdas na propagação do sinal de radio, particionamento topológico, limitação do número de saltos e garantia da QoS das aplicações. Alguns desses desafios correspondem a uma camada específica (PHY, MAC, NET) e outros podem ser abordados em mais de uma camada. Porém, no padrão WBAN só se definem as funcionalidades das camadas PHY e MAC, sem considerar aspectos da camada de rede (NET). Então, existe mais liberdade para superar esses desafios através da proposta de protocolos de roteamento.

Como resultado de vários trabalhos com foco no desenvolvimento e estudos de protocolos de roteamento para WBAN, se tem obtido um número considerável de protocolos. Estes foram inicialmente classificados em cinco tipos de acordo com seus objetivos e estão estritamente relacionados com os desafios de WBAN [33], [12]. Estes grupos são categorizados como: protocolos de roteamento baseados em *cluster*, baseados em qualidade de serviço, baseados em movimentos corporais, baseados na temperatura e protocolos *cross-layer*.

Os protocolos baseados em *cluster* estão entre os primeiros propostos, entre 2004 e 2007, antes da publicação do padrão WBAN; por isso não se limitam às topologias indicadas no padrão. Estes protocolos estão focados principalmente em melhorar a eficiência energética da rede sem considerar outros desafios de WBAN como o superaquecimento e particionamento topológico. Têm desvantagens como a sobrecarga de pacotes de controle e atrasos exigidos para a manutenção de *clusters*. Por isso, nesta dissertação se considera

que esses protocolos não são os mais adequados para serem utilizados nas WBANs [33].

Por outro lado, os protocolos *cross-layer* têm alto desempenho, baixo consumo de energia e um atraso fim-a-fim relativamente fixo. Porém, não podem fornecer alto desempenho em casos de movimento do corpo e altas perdas de propagação [33]. Esses protocolos foram propostos entre 2006 e 2009 e não se adequam ao padrão IEEE 802.15.6.

Um desafio de grande importância nas WBANs é o superaquecimento dos nós. Os protocolos baseados na temperatura são propostos para evitar o aquecimento, mas não incluem métricas de qualidade de rede. Por isso, atualmente, esta abordagem está presente apenas de uma forma combinada com outras abordagens.

Para enfrentar o problema de particionamento topológico ou desconexão dos enlaces causada pelo movimento corporal, entre 2009 e 2012 foram propostos um grupo de protocolos baseados em movimentos [5]. Geralmente essas propostas utilizam modelos probabilísticos para estimar a ocorrência de perda do enlace pelo movimento do corpo, como por exemplo o protocolo ETPA [32].

Os protocolos baseados em QoS fornecem principalmente módulos separados para diferentes métricas de QoS que operam de maneira coordenada. Assim, eles fornecem boa confiabilidade, baixo atraso fim-a-fim e alta taxa de entrega de pacotes (PDR). Esses protocolos sofrem principalmente de alta complexidade devido aos vários módulos e diferentes métricas de QoS que possuem e operam simultaneamente. Os últimos trabalhos publicados pertencem a esta classificação, principalmente devido à importância de garantir QoS para as aplicações médicas. Métricas como energia e temperatura também são consideradas para tentar atingir vários desafios em uma mesma proposta. Porém, estas propostas não consideram o movimento do corpo.

As propostas mais recentes já consideram as especificações do padrão WBAN, por exemplo o protocolo *Two-Hop* apresentado em [7]. Nesse protocolo os pacotes primeiramente são classificados segundo a prioridade. Os pacotes de prioridade alta e média são transmitidos diretamente para o nó coordenador, enquanto os pacotes de prioridade normal são transmitidos por um caminho de dois saltos, no qual o nó intermediário é escolhido com base na energia residual dos nós. Porém, esse protocolo não considera o aquecimento dos nós.

De forma similar, o protocolo LAEEBA [1] seleciona o nó retransmissor com base na energia residual e a distância até o nó coordenador. Com o parâmetro energia residual se consegue balancear o consumo energético e com a distância, pretende-se diminuir as

perdas de caminho. Já o protocolo *Relay Based* [21] apresenta um esquema que utiliza um retransmissor alocado na roupa dos pacientes. Esse nó retransmissor por estar fora do corpo poderia transmitir para o nó coordenador com menos restrições de potência que um nó implantado, mas tem como inconveniente que as pessoas precisariam recolocar os retransmissores sempre que trocarem de roupa, o qual cria uma dependência de pacientes idosos a outras pessoas para a colocação dos nós.

No padrão WBAN se define o uso de uma topologia em estrela com comunicação direta entre os nós sensores e o nó coordenador, ou no máximo utilizando um caminho de dois saltos. No entanto, essa dissertação argumenta que nem sempre o caminho direto é o de melhor qualidade. Observa-se que pode existir mais de um caminho de dois saltos disponível, e nesse caso a seleção do caminho deve garantir o melhor desempenho na rede.

Por exemplo, na Tabela 1.1 se apresenta o mapa de conectividade de uma rede WBAN real analisada em [14]. Nessa rede o nó zero atua como coordenador e está alocado no lado direito da cintura; os nós restantes (nós 1-5) são nós sensores alocados nos pulsos, pés e o peito. Quando se analisa a qualidade dos enlaces entre os diferentes nós que compõem a rede, pode-se observar que o enlace 3-0 apresenta a qualidade mais baixa na comunicação direta. Por outro lado, caminhos alternativos como 3-4-0 estão compostos por enlaces de melhor qualidade.

Tabela 1.1: Mapa de conectividade da rede.

Taxa de entrega de pacotes - Nós Transmissores (filas) x Nós Receptores (colunas)

	Nó 0	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5
Nó 0	—	63,80 ± 0,79	97,05 ± 0,19	48,10 ± 1,11	77,20 ± 0,77	58,60 ± 0,92
Nó 1	68,35 ± 0,92	—	81,70 ± 0,53	81,85 ± 0,74	60,80 ± 0,93	42,60 ± 1,22
Nó 2	97,55 ± 0,13	81,70 ± 0,68	—	60,25 ± 0,93	73,90 ± 0,95	37,20 ± 0,60
Nó 3	57,75 ± 0,91	78,90 ± 0,75	59,55 ± 0,95	—	85,85 ± 0,43	26,70 ± 0,68
Nó 4	75,10 ± 0,89	57,85 ± 1,19	76,50 ± 0,68	86,25 ± 0,45	—	25,35 ± 0,97
Nó 5	59,70 ± 0,82	40,35 ± 1,03	38,10 ± 1,02	28,55 ± 0,93	27,95 ± 0,82	—

O mapa de rede supracitado foi obtido utilizando o modelo de mobilidade do corpo proposto em [43] que considera uma pessoa andando em diferentes velocidades, mas se considera a movimentação do corpo humano nas diferentes posições que pode adotar durante as atividades diárias como sentado, dormindo em posição fetal, entre outras. A qualidade dos enlaces pode variar com relação à posição dos nós no espaço e a distância entre eles. Nesse caso, a situação apresentada no exemplo supracitado torna-se mais variável.

O fato de utilizar a comunicação direta entre os nós sensores e o nó coordenador ou uma rota de dois saltos, quando podem existir rotas alternativas com melhor qualidade, leva a um envio de dados pouco eficiente. Precisamente este é o problema a ser resolvido no presente trabalho, evitando-se o superaquecimento de nós retransmissores intermediários.

Nos diferentes protocolos abordados em [5], algumas propostas como LAEEBA [1] e *Relay Based* [21] propõem protocolos para a seleção do nó retransmissor com base na energia residual, mas não foi encontrada uma proposta para lidar com desafios como particionamento topológico e perdas de caminho baseada na qualidade do enlace, em um cenário de comunicação Intra-WBAN. No trabalho apresentado em [49] resultados experimentais mostram que existe uma relação direta entre o Indicador de Intensidade de Sinal Recebido, *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), e a mobilidade do corpo humano.

Nesse contexto, surge a hipótese de que utilizando rotas alternativas de melhor qualidade, pode-se melhorar o desempenho da rede. Então, disponibilizando várias rotas até o nó coordenador, uma escolha baseada na qualidade dos enlaces pode melhorar o desempenho da rede.

Por isso esta dissertação tem como objetivo geral desenvolver um protocolo de roteamento para WBAN baseado na qualidade dos enlaces com prevenção do aquecimento satisfazendo os requisitos definidos no padrão WBAN.

Nesse sentido, é projetado o protocolo LATOR como proposta para o roteamento em WBAN. Este consiste em um roteamento sob demanda que explora a qualidade dos enlaces e utiliza esta como métrica para a escolha das rotas em cenários WBANs. Como referência para evitar o aumento da temperatura se considera o calor gerado pela radiação das antenas e a potência dissipada pelos componentes eletrônicos dos nós.

Entre as principais contribuições do protocolo LATOR pode-se citar: (1) o aumento do PDR na comunicação intra-WBAN, quando a comunicação direta entre nós sensores e o nó coordenador tem baixa qualidade; (2) a seleção de rotas com base na informação de qualidade dos enlaces; (3) a mitigação do superaquecimento dos nós, sem trocar informação de temperatura entre nós vizinhos e; (4) a descoberta de novas rotas ante a quebra dos enlaces pelo movimento do corpo.

LATOR foi implementado e avaliado utilizando o *framework* Castalia no simulador OMNET++. A avaliação foi realizada por simulação, utilizando parâmetros experimentais do comportamento do canal sem fio no corpo humano e considerando a mobilidade

do corpo humano.

1.1 Organização da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, a presente dissertação consta de mais cinco capítulos, cujos conteúdos estão organizados da seguinte forma.

No Capítulo 2 é exposta uma visão geral dos fundamentos teóricos das WBANs. São abordadas as características, arquitetura de comunicação, as aplicações na área de saúde e os requerimentos de QoS. São apresentadas questões de segurança, topologia, modelo de referência, camada física e camada MAC definidas no padrão. Também são apresentados os desafios a enfrentar no projeto e desenvolvimento das WBANs e as principais fontes que contribuem ao aquecimento dos nós.

No Capítulo 3, são apresentados os trabalhos relacionados aos protocolos de roteamento desenvolvidos para WBAN. Se apresenta uma classificação dos protocolos, definida na literatura segundo os seus objetivos. Se expõe uma visão geral de cada grupo e os protocolos mais relevantes em cada caso.

No Capítulo 4, é apresentado o protocolo LATOR. São discutidos o princípio de funcionamento, os diferentes tipos de mensagens utilizadas e a estrutura e funcionalidade da tabela de roteamento. Se apresenta o mecanismo do protocolo para coletar a informação de qualidade do enlace durante o processo de descoberta de rota e as ações a tomar em caso de perda do enlace ou aquecimento dos nós. Se expõe como são geradas e processadas as diferentes mensagens de controle e dados na rede. Também é exposto o procedimento para evitar o aumento de temperatura dos nós.

No Capítulo 5, é apresentada a implementação e avaliação do protocolo LATOR e o *framework* Castália, utilizado para a implementação e avaliação da proposta. É explicado mediante um diagrama conceitual como foi implementado o protocolo e as relações com os módulos do Castália. Também é apresentado o cenário utilizado para a avaliação da proposta e os experimentos realizados para avaliar o desempenho do protocolo proposto. Por último, são apresentados os resultados obtidos e a análise dos mesmos.

No Capítulo 6 são expostas as conclusões finais desta dissertação e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo se expõe uma visão geral dos fundamentos teóricos das Redes Corporais Sem Fio (WBAN). Especificamente são consideradas questões principais que servem de base para os capítulos posteriores. Inicialmente se apresenta a WBAN e sua arquitetura de comunicação. Depois se aborda o uso de WBAN na área da saúde, com foco nos requisitos de QoS das aplicações médicas. São abordados aspectos definidos no padrão WBAN, entre eles: questões de segurança, topologia, modelo de referência, camada física e camada MAC. Também são apresentados os desafios a enfrentar no projeto e desenvolvimento das WBANs, os quais estão estreitamente ligados às suas características específicas. Por último se apresentam aspectos relacionados ao aquecimento dos nós e à transferência de calor no corpo humano.

2.1 Redes Corporais Sem Fio

As Redes Corporais Sem Fio (WBAN) consistem de vários dispositivos heterogêneos que se comunicam entre si por meio de uma rede sem fio nos arredores do corpo humano. Esses dispositivos são classificados em três tipos: (1) nós sensores, respondem a estímulos físicos, coletam dados, processam e relatam essas informações usando comunicação sem fio; (2) nós atuadores, agem de acordo com dados recebidos de nós coordenadores, advindas de comandos externos ou interação do usuário; (3) nós coordenadores/coletores, agem como agregadores das informações coletadas pelos nós sensores, além de enviar comandos para os nós atuadores [41].

Estes dispositivos estão espalhados por todo o corpo humano e a localização exata depende da aplicação [34]. Na Figura 2.1 se apresentam diferentes nós WBAN espalhados no corpo. Nessa figura se representam o nó coordenador (dispositivo pessoal), um nó atu-

ador para a injeção de insulina e os demais são nós sensores. Estes dispositivos podem ser implantados no corpo, colocados no corpo humano com um pequeno adesivo ou vestíveis (*wearables*), permitindo atividade ubíqua, medições fisiológicas e ambientais no ambiente natural durante um longo período de tempo.

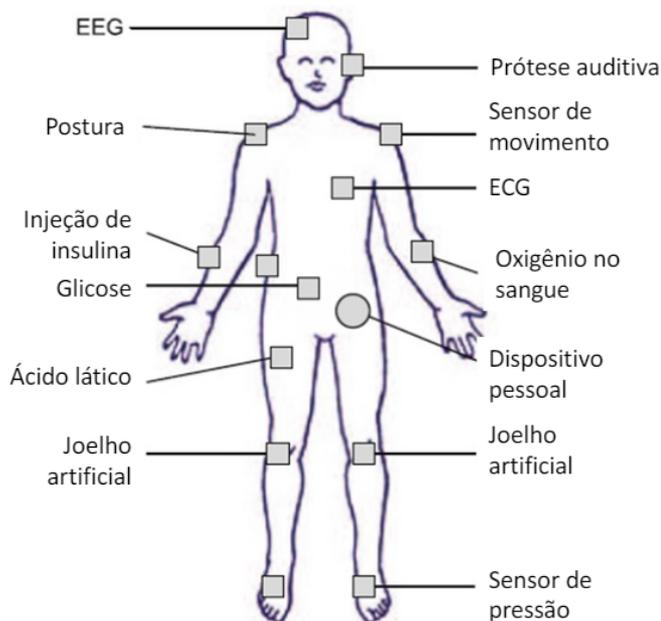


Figura 2.1: Nós WBAN posicionados no corpo humano [26].

Os principais componentes de um nó sensor WBAN são: transceptor de rádio com uma antena para comunicação sem fio, microprocessador, memória, sensores bioquímicos ou analógicos e uma bateria para alimentação elétrica. Esses nós normalmente têm capacidade de processamento limitada, poucos requisitos de memória e baixa sobrecarga do sistema. Os nós atuadores, além desses componentes, também contam com um elemento atuante, por exemplo, uma bomba de insulina [28].

Os nós sensores dedicados a medir parâmetros fisiológicos no corpo humano são identificados como dispositivos fisiológicos e se classificam em três tipos: comprimidos, vestíveis e implantáveis. Os dispositivos comprimidos 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. Os dispositivos vestíveis são sensores portáteis com um transceptor sem fio montado na superfície do corpo humano como parte de acessórios, por exemplo *smart watches*, *smart bands* ou mesmo sensores em forma de anel usados no dedo para monitorar parâmetros como a frequência cardíaca. Os dispositivos implantáveis são colocados no paciente para operar dentro do corpo humano, como por exemplo,

sensores de nível de glicose ou atuadores para injeção de insulina [16].

Entre os principais parâmetros fisiológicos e sinais biológicos monitorados nas aplicações médicas estão: pressão arterial, batimento cardíaco, temperatura corporal, nível de toxinas, glicose, oxigênio em sangue, eletrocardiograma (ECG), eletroencefalograma (EEG) e eletromiograma (EMG). Na Tabela 2.1 são listadas algumas tecnologias de sensoriamento de biosinais com seus dados medidos correspondentes [13].

Tabela 2.1: Sensores de biosinais utilizados em WBAN.

Biosinal	Tipo do sensor	Dado medido
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.
Movimentos Corporais	Acelerômetro	Medição de forças de aceleração no espaço 3D.
ECG	Eletrodos de pele / tórax	Atividade do coração.
EMG	Eletrodos colocados sobre o músculo	Atividade elétrica dos músculos esqueléticos.
EEG	Eletrodos colocados no couro cabeludo	Medição da atividade elétrica cerebral involuntária e outros potenciais cerebrais.

A arquitetura de comunicação de WBANs é agrupada em três níveis diferentes, segundo se ilustra na Figura 2.2. A comunicação Intra-WBAN (*Tier 1*) inclui a comunicação entre dispositivos que compõem a WBAN, entre os nós sensores/atuadores e o nó coordenador. A comunicação Inter-WBAN (*Tier 2*) considera a comunicação entre o nó coordenador e um ponto de acesso, *Access Point* (AP), que pode ser um dispositivo pessoal como telefone. O ponto de acesso permite a comunicação da WBAN com outras redes e pode dar suporte para várias WBANs existentes no mesmo corpo ou na mesma área de cobertura do AP. A comunicação *Beyond-WBAN* (*Tier 3*) compreende a comunicação

entre o AP e a Rede de Longa Distância, *Wide Area Network* (WAN) [35].

As comunicações entre os diferentes níveis podem ser suportadas por várias tecnologias, por exemplo: Bluetooth, Zigbee, WLAN ou GPRS/3G/4G/5G. Cada uma dessas tecnologias oferece características específicas, permitindo que ela atenda às restrições de algumas aplicações WBAN, mas essas tecnologias ficam como alternativas a usar nas comunicações Inter-WBAN e *Beyond-WBAN*. Para a comunicação Intra-WBAN foi desenvolvido o padrão IEEE 802.15.6 [15].

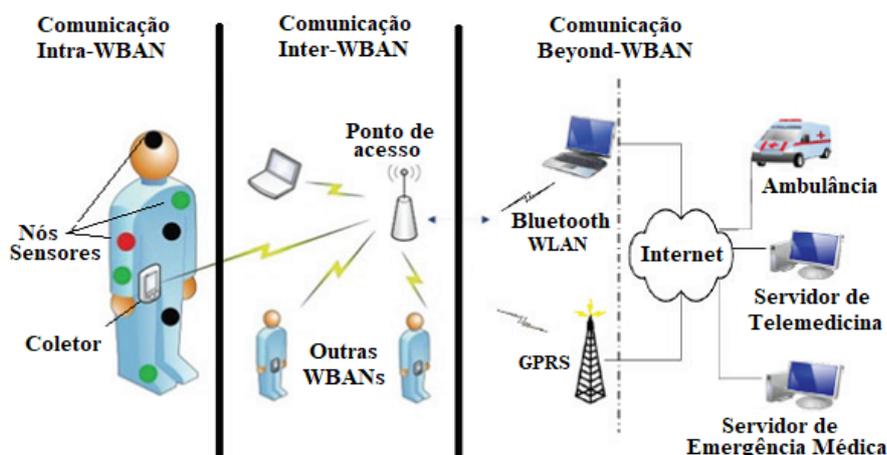


Figura 2.2: Arquitetura de comunicação de WBANs [35].

2.2 Aplicações Médicas e seus Requisitos

As aplicações de WBAN abrangem várias áreas, entre elas pode-se mencionar a assistência médica, entretenimento, esporte, jogos e militar [13]. Especificamente as aplicações médicas são o principal ente motivador para seu desenvolvimento, já que WBAN tem um grande potencial para diagnóstico de doenças e monitoramento de pacientes.

As aplicações médicas de WBAN podem ser classificadas em três subcategorias: (1) aplicações médicas vestíveis (*Wearable WBAN*) consideram o uso de acessórios para assistir pessoas com deficiência e ajudar na gestão do desempenho do corpo humano; (2) aplicações médicas implantáveis (*Implant WBAN*) abarcam aplicações onde os nós são implantados no corpo humano, principalmente para o controle de diabetes, detecção de câncer e doenças cardiovasculares; (3) controle remoto de dispositivos médicos, a conectividade de uma WBAN à Internet ubíqua permite a conectividade de dispositivos e serviços de atendimento médico domiciliar, conhecida como Ambiente de Vida Assistido, *Ambient Assisted Living* (AAL). AAL tem como objetivo prolongar o autocuidado de

pacientes assistidos em casa, minimizando a dependência de cuidados pessoais intensos, aumentando a qualidade de vida e diminuindo os custos da sociedade. Nesse contexto o monitoramento remoto e sistemas de telemedicina são as aplicações mais importantes [34].

Todas essas aplicações têm como base informações de parâmetros fisiológicos e sinais biológicos do corpo humano. Esses sinais são coletados pelos nós sensores e encaminhados, através da arquitetura de comunicação apresentada na Figura 2.2, para um local remoto, como um centro de emergência ou um consultório médico, onde serão processados e monitorados por um profissional da saúde. Quando são detectadas condições anormais nesses sinais, o médico pode diagnosticar precocemente e atuar em correspondência com o nível de risco do paciente.

Todo tipo de rede deve proporcionar os parâmetros adequados para garantir QoS às aplicações. Nas aplicações médicas de WBAN, este é um aspecto de extrema importância, pois lida com sinais vitais dos pacientes. Por isso, é esperado que a WBAN forneça uma resposta rápida e confiável em situações de emergência.

Tabela 2.2: Requisitos de taxa de dados para aplicações WBANs [13].

Aplicação	Taxa de dados	Latência	BER
Acelerômetro	$< 10 \text{ kbps}$	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
Giroscópio	$< 10 \text{ kbps}$	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
Respiração	$0,24 \text{ kbps}$	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
Pressão arterial	$0,05 \text{ kbps}$	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
Temperatura	$2,4 - 50 \text{ bps}$	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
Monitor de nível de glicose	$< 1 \text{ kbps}$	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
Fornecimento de medicação	$< 16 \text{ kbps}$	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
ECG	192 kbps	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
EEG	$86,4 \text{ kbps}$	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
EMG	$1,536 \text{ Mbps}$	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
Estimulação cerebral profunda	$< 320 \text{ kbps}$	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
Endoscopia através da cápsula	1 Mbps	$< 250 \text{ ms}$	$< 10^{-10}$
Fluxo de áudio	1 Mbps	$< 20 \text{ ms}$	$< 10^{-5}$
Fluxo de vídeo	$< 10 \text{ Mbps}$	$< 100 \text{ ms}$	$< 10^{-3}$
Voz	$50 - 100 \text{ kbps}$	$< 100 \text{ ms}$	$< 10^{-3}$

Entre os parâmetros a considerar estão: a taxa de dados, PDR, latência, *jitter* e a taxa de erro de bit (BER). Nas aplicações médicas a taxa de dados pode variar desde valores abaixo de 1 kbps, por exemplo no monitoramento da temperatura corporal, até 10 Mbps, quando se trata de aplicações com *streaming* de vídeo, como pode ser uma endoscopia. A taxa de entrega de pacotes é influenciada pela qualidade do canal. Nesse

aspecto, a escolha dos caminhos para o envio de dados é determinante. Por outro lado, as camadas física e de acesso ao meio oferecem métodos para correção de erros e prevenção de interferência, a fim de reduzir o BER. A Tabela 2.2 lista algumas aplicações com seus requisitos de QoS [10], [2] .

2.3 Padrão IEEE 802.15.6

Como resultado dos trabalhos desenvolvidos com foco em WBAN, no ano 2012 foi publicado o padrão IEEE 802.15.6 [15]. Nele se definem além de questões gerais de WBAN, as funcionalidades e características das camadas PHY e MAC. Porém, aspectos relativos aos protocolos de roteamento para WBAN não são abordados no padrão.

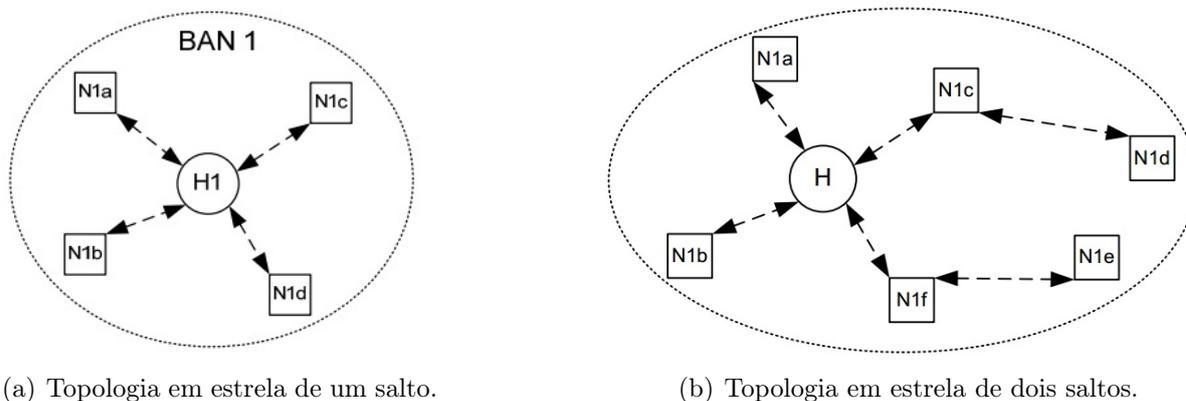
Este padrão foi proposto para comunicação sem fio de curto alcance, na vizinhança ou mesmo dentro do corpo humano. Esta norma utiliza as bandas de radiofrequência para fins industriais, científicos e médicos (ISM), bem como faixas de frequências aprovadas por associações médicas e as autoridades reguladoras de cada país.

Os requisitos do padrão incluem suporte para 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.).

Uma das questões de maior preocupação na implementação de WBAN é a segurança. No padrão IEEE 802.15.6 para garantir segurança se definem três níveis: (1) Nível 0, comunicação não protegida. É o nível de segurança mais baixo do padrão. Neste nível os dados são transmitidos sem nenhum mecanismo de segurança; (2) Nível 1, apenas autenticação. É um nível de segurança médio onde os dados são transmitidos com autenticação segura, mas não são criptografados. A confidencialidade e a privacidade não são suportadas por este modo; (3) Nível 2, autenticação e criptografia. Este é o nível de segurança mais alto onde os dados são transmitidos com autenticação segura e em quadros criptografados. Para criptografar os dados utilizam-se chaves temporais para cada sessão [15].

O padrão WBAN define o uso da topologia em estrela. A rede é organizada em conjuntos lógicos, referidos como BAN (*Body Area Network*). Cada BAN conta com um nó coordenador (*sink*) no centro da topologia e nós sensores à distância de um salto,

como na Figura 2.3(a). 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 2.3(b). Assim, informação dos nós sensores só pode ser enviada para o nó coordenador, utilizando no máximo dois saltos [15].



(a) Topologia em estrela de um salto.

(b) Topologia em estrela de dois saltos.

Figura 2.3: Topologias de WBAN [15].

Todos os nós de uma BAN, tanto sensores quanto o coordenador, seguem o modelo de referência definido no padrão, segundo se pode ver na Figura 2.4. No modelo de referência, a subcamada MAC fornece seu serviço ao cliente MAC (camada superior) por meio do Ponto de Acesso de Serviço (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 (MSDU) para a subcamada MAC via MAC SAP, e a subcamada MAC passa quadros MAC, como unidades de dados de protocolo MAC (MPDU), para a camada PHY via PHY SAP.

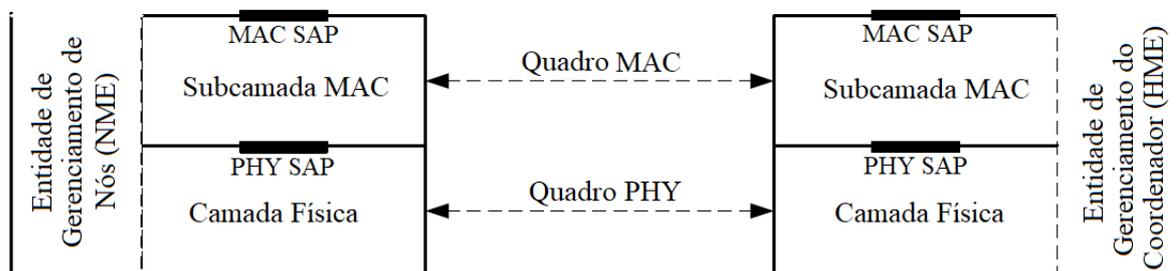


Figura 2.4: Modelo de Referência IEEE 802.15.6 [15].

Por sua parte a Entidade de Gerenciamento de Nó, *Node Management Entity* (NME), e a Entidade de Gerenciamento do Coordenador, *Hub Management Entity* (HME), são interfaces de informações de gerenciamento de rede lógicas para trocar informações entre camadas. Elas não são obrigatórias, nem seu comportamento é especificado pelo padrão.

2.3.1 Camada Física

Segundo o padrão IEEE 802.15.6 [15], a camada física (PHY) é responsável pela: (1) ativação e desativação do transceptor de rádio, (2) verificação de uso do canal sem fio (CCA), (3) transmissão e recepção de dados. 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). Em outras palavras empacotar o quadro recebido da camada MAC no quadro da camada PHY para ser transmitido e desempacotar em sentido reverso.

O padrão WBAN define três variantes para a camada física: Banda Estreita (NB), NB-PHY; Banda Ultra larga (UWB), UWB-PHY; e Comunicações dentro do Corpo Humano (HBC), HBC-PHY. A escolha de qual delas utilizar depende da aplicação alvo, por exemplo: se é uma aplicação médica ou não, e também se a comunicação é dentro, sobre ou fora do corpo. No padrão se especificam as faixas de frequências, larguras de banda, tipo de modulação e estrutura dos quadros.

O NB-PHY utiliza técnicas de modulação diferencial: DBPSK, DQPSK e D8PSK, exceto na banda para Serviço de Telemetria Médica Sem Fio (WMTS), na faixa de 420-450 MHz, que usa a modulação GMSK. Para NB-PHY se têm definidas sete faixas de frequências diferentes [15]. Entre elas a faixa 2360-2400 MHz foi atribuída exclusivamente para uso em dispositivos médicos. Esta faixa permite suportar aplicações que demandam alta taxa de dados e também foi uma tentativa de diminuir a interferência resultante da coexistência tecnológica na banda ISM [34]. Na Tabela 2.3, se mostram as bandas de frequências e tipos de modulação de NB-PHY segundo o padrão WBAN. Um dispositivo compatível com NB-PHY deve ser capaz de suportar transmissão e recepção em pelo menos em uma dessas bandas de frequências.

Tabela 2.3: Bandas de frequências e tipos de modulação para NB-PHY [15].

Banda	Frequência	Largura de Banda	Modulação
MICS	402-405 MHz	300 kHz	π /M-DPSK (M=2, 4, 8)
WMTS (Japão)	420-450 MHz	320 kHz	GMSK (M=2)
WMTS (Europa)	863-870 MHz	400 kHz	π /M-DPSK (M=2, 4, 8)
ISM (EUA, Austrália, Nova Zelândia)	902-928 MHz	400 kHz	π /M-DPSK (M=2, 4, 8)
ISM (Japão)	950-958 MHz	400 kHz	π /M-DPSK (M=2, 4, 8)
NB-PHY	2360-2400 MHz	1 MHz	π /M-DPSK (M=2, 4, 8)
ISM (worldwide)	2400-2483.5 MHz	1 MHz	π /M-DPSK (M=2, 4, 8)

Na NB-PHY, o PSDU é anexado a um preâmbulo de camada física (*PLCP Preamble*) e um cabeçalho de camada física (*PLCP Header*) para criar a PPDU, como se ilustra na Figura 2.5. O preâmbulo do Protocolo de Convergência da Camada Física (PLCP) é o primeiro componente da PPDU e é usado para auxiliar o receptor durante a sincronização temporal e a recuperação do deslocamento da portadora.

O cabeçalho PLCP é o segundo componente principal da PPDU. Este campo transmite as informações necessárias sobre os parâmetros PHY para auxiliar na decodificação da PSDU no receptor. Contém os campos: RATE, LENGTH, BURST MODE, SCRAMBLER SEED, bits reservados, uma Sequência de Verificação de Cabeçalho (HCS) e bits de paridade BCH para correção de erros. O cabeçalho PLCP deve ser transmitido usando a taxa de dados de cabeçalho especificada na faixa de frequência em operação.

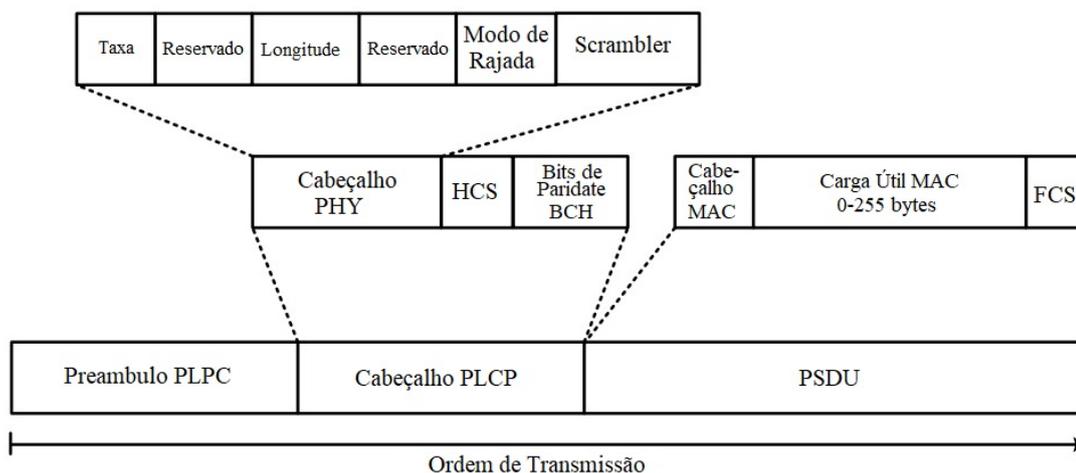


Figura 2.5: Estrutura da unidade de dados da camada física NB-PHY [15].

A especificação da camada UWB-PHY foi projetada para oferecer um desempenho robusto para as WBANs e fornecer um grande escopo para oportunidades de implementação de alto desempenho, robustez, baixa complexidade e operação em baixa potência. O interesse em UWB-PHY reside no fato de que os níveis de potência do sinal estão na ordem daqueles usados na banda para serviço de comunicação de implante médico (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), o cabeçalho de camada física (PHR) e a unidade de dados de serviço de camada física (PSDU), segundo se mostra na Figura 2.6.

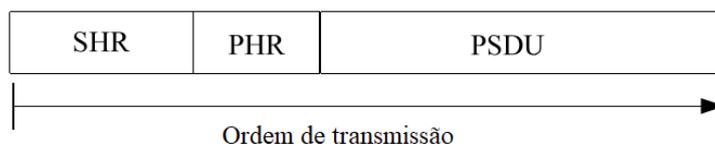


Figura 2.6: Estrutura da unidade de dados da camada física UWB-PHY [15].

O campo SHR é dividido em duas partes. A primeira parte é o preâmbulo, destinado à sincronização temporal, detecção de pacotes e recuperação de deslocamento de frequência da portadora. A segunda parte é o delimitador de início de quadro (SFD). 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. Essas informações são usadas pelo receptor para decodificar a PSDU.

O UWB-PHY opera em duas bandas de frequência: banda baixa e banda alta. Cada banda é dividida em canais, todos eles caracterizados por uma largura de banda de 499,2 MHz. A banda baixa consiste em apenas 3 canais (1-3). O canal 2 tem uma frequência central de 3993,6 MHz e é considerado um canal obrigatório. A banda alta consiste em oito canais (4-11) onde o canal 7 com uma frequência central de 7987,2 MHz é considerado um canal obrigatório.

A camada física HBC-PHY usa a tecnologia de Comunicação de Campo Elétrico, *Electric Field Communication* (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.

O pacote HBC, mostrado na Figura 2.7, é composto pelo preâmbulo PLCP, o delimitador de início de quadro (SFD), o cabeçalho PLCP e a carga (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 CRC-8. Um dispositivo compatível deve ser capaz de suportar transmissão e recepção na faixa de 21 MHz.

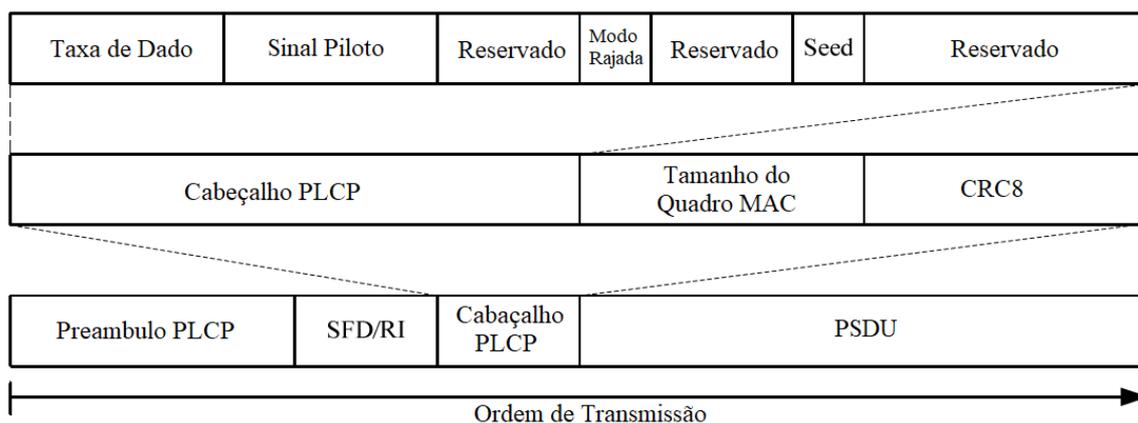


Figura 2.7: Estrutura da unidade de dados da camada física HBC-PHY [15].

2.3.2 Camada MAC

A camada MAC tem como principais funções: controle de acesso ao meio, agendamento da transmissão, empacotamento dos dados e delimitação de quadros, manipulação de erros e gerenciamento de energia. Com essas funções se enfrentam aspectos como: (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) escuta ociosa (*idle listening*), que ocorre quando um nó escuta um canal ocioso para receber dados; (3) sobre escuta (*over hearing*), que ocorre quando um nó escuta o canal para receber quadros que são destinados a outros nós, os quais contribuem ao gasto de energia dos nós [44].

Na camada MAC definida no padrão IEEE 802.15.6 para as redes WBAN, o canal inteiro é dividido em períodos de *beacon*, ou superquadros, para alocação de recursos. O nó coordenador é o responsável por escolher os períodos de *beacon* de igual comprimento para delimitar os superquadros e habilitar a sincronização de dispositivos e associação de rede [15].

De acordo com o padrão IEEE 802.15.16, o quadro MAC ilustrado na Figura 2.8 consiste em um cabeçalho MAC de tamanho fixo, um corpo de quadro MAC de comprimento variável e um campo FCS de comprimento fixo. O cabeçalho MAC contém as informações de controle do quadro, como versão do protocolo, política de reconhecimento, nível de segurança, retransmissão, entre outras. 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 verificação de redundância cíclica (CRC) de 16 bits para detecção

de erro.

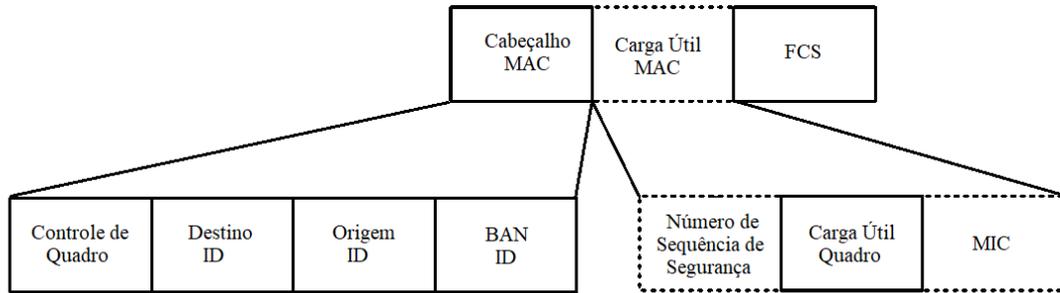


Figura 2.8: Formato do quadro MAC [15].

No padrão descrevem-se três modos para o acesso, coordenados pelo nó coordenador:

- (1) modo *beacon* com limites de superquadro, *beacon mode with superframe boundaries*;
- (2) modo sem *beacon* com limites de superquadro, *non-beacon mode with superframe boundaries*;
- (3) modo sem *beacon* e sem limites de superquadro, *non-beacon mode without superframe boundaries*.

No modo *beacon* com limites de superquadro, o nó coordenador envia *beacons* em cada período de *beacon* a menos que seja proibido por restrições na banda MICS ou em superquadros inativos. Também o nó coordenador 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).

Na Figura 2.9, se pode observar a distribuição dessas fases em um superquadro. Nos intervalos de alocação de EAP, RAP e CAP, um nó pode obter e iniciar transações de quadros MAC, usando o acesso ao canal baseado nos protocolos ALOHA ou *Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance* (CSMA/CA). No MAP, o nó coordenador deve organizar os intervalos de alocação e agendar as transmissões [15].

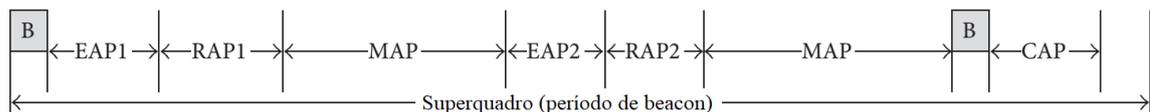


Figura 2.9: Superquadro MAC em modo *beacon* com limites de superquadro [47].

No modo sem *beacon* com limites de superquadro, o nó coordenador não transmite *beacons* e é forçado a usar apenas um período de acesso MAP durante todo o superquadro. No modo sem *beacon* e sem limites de superquadro, o coordenador só fornece 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

acesso com contenção, o que significa que cada nó deve estabelecer seu próprio horário independentemente.

2.4 Desafios em WBAN

Na revisão bibliográfica, foram identificados vários desafios a enfrentar no projeto e desenvolvimento das WBANs. Estes estão estritamente associados às características específicas de WBAN. Alguns desses desafios correspondem a uma camada específica (PHY, MAC, *Network* (NET)) e outros podem ser abordados em mais de uma camada. Porém, como no padrão WBAN só se definem as funcionalidades das camadas PHY e MAC, deixando de lado a camada de rede (NET), existe mais liberdade para atingir esses desafios na hora de implementar os protocolos de roteamento. Entre os principais desafios identificados na literatura estão:

- ***Eficiência energética.*** Quando se fala de eficiência energética, se refere tanto ao consumo de energia local dos nós, quanto à vida útil total da rede. Estes são de grande importância em WBAN, já que considera cenários onde vão existir sensores biomédicos implantados, nos quais não é possível substituir frequentemente a fonte de energia.
- ***Recursos limitados.*** As WBANs, além da fonte de energia, também têm outros recursos limitados. Por exemplo, pouca capacidade de computação, capacidade de armazenamento limitada e pequena largura de banda.
- ***Qualidade de serviço.*** Para garantir QoS, deve-se cumprir com valores estabelecidos de parâmetros como: *jitter*, latência, perda de pacotes e taxa de transferência, segundo diferentes tipos de dados. Em WBAN, garantir QoS é muito importante, pois os dados a transmitir são sinais vitais do corpo humano, que podem estar sendo utilizados para fins médicos.
- ***Absorção de radiação e superaquecimento.*** O aumento da temperatura afeta os órgãos sensíveis ao calor do corpo humano, provocando uma alteração na funcionalidade do órgão ou danificando alguns tecidos do corpo humano [46]. No cenário das WBAN, as duas fontes de aumento de temperatura de um nó são: a absorção de radiação de antena e consumo de energia dos circuitos do nó. Para atingir a absorção de radiação, é imprescindível utilizar baixas potências de transmissão

e o aumento de temperatura dos nós por consumo energético pode ser controlado evitando períodos longos de operação dos nós.

- **Perdas do caminho.** A perda do caminho (*Path Loss*) é uma medida da diminuição na densidade de potência de uma onda eletromagnética à medida que se propaga através do meio sem fio. Em WBAN a comunicação sem fio entre os nós sensores implantados é através do corpo humano, onde o expoente de perda de caminho é variável e consideravelmente alto em comparação com o espaço livre.
- **Particionamento topológico.** Em WBAN um problema típico a enfrentar é a desconexão de enlaces por causa dos movimentos corporais e transmissões de curto alcance, o qual pode provocar o particionamento da topologia de rede. Por isso, é importante que os protocolos de roteamento considerem as mudanças topológicas.
- **Topologia de rede.** Embora o padrão WBAN sugira o uso de topologia em estrela, outras topologias de rede poderiam ser usadas para WBAN devido à restrição de energia, movimentos posturais do corpo, natureza heterogênea dos sensores e alcance de transmissão curto.
- **Ambiente heterogêneo.** Em WBAN, para detectar e monitorar os diferentes parâmetros de saúde dos seres humanos são necessários diferentes tipos de nós sensores, os quais podem diferir em computação, capacidade de armazenamento, consumo de energia e com diferentes taxas de amostragem. Essa natureza heterogênea das WBANs impõe mais alguns desafios principalmente para dar suporte a QoS.
- **Segurança e privacidade.** Em WBAN a segurança é uns dos aspectos cruciais, pois trata-se de uma tecnologia que pode lidar com o risco de vida das pessoas, em alguns casos. Porém é impossível aplicar técnicas convencionais de segurança e privacidade devido à baixa disponibilidade de energia e pouca capacidade de computação. Por isso, torna-se um desafio garantir privacidade e segurança dos dados do paciente ao projetar uma WBAN. Como foi supracitado, no padrão WBAN este aspecto é abordado.
- **Limitação do número de saltos.** No padrão IEEE 802.15.6, é permitida uma comunicação de no máximo dois saltos. Devido ao particionamento topológico associado ao movimento do corpo e às baixas potências de transmissão, um algoritmo de roteamento deve ser capaz de encontrar rotas alternativas de até dois saltos.

2.5 Aquecimento dos nós em WBAN

Para evitar o aquecimento dos nós, é necessário conhecer a variação de temperatura que eles experimentam. Dado que em WBAN os nós têm tamanho pequeno e devem ser o mais simples possível, considera-se que os nós não contam com um sensor para medir a temperatura. Nos trabalhos apresentados em [45] e [46], é realizada uma estimativa da temperatura observando as atividades do nó. Então, a forma em que um protocolo de roteamento opera tem um efeito direto sobre as atividades do nó, que por sua vez afeta a temperatura.

As principais fontes que contribuem para o aquecimento dos nós em WBANs são a dissipação de energia pelo circuito do nó sensor e a radiação da antena. A dissipação de energia do circuito aumenta a temperatura dependendo da tecnologia e arquitetura de implementação do nó WBAN. Sendo a densidade de dissipação de energia, a energia consumida (Pc) pelo circuito do nó dividida pelo volume do nó [46].

Para analisar os efeitos da radiação da antena no tecido, se considera a Taxa de Absorção Específica, *Specific Absorption Rate* (SAR). Esta registra a taxa na qual a energia de radiação é absorvida pelo tecido por unidade de peso. A relação entre radiação e SAR é dada pela Equação 2.1. Sendo E é o campo elétrico induzido no tecido, σ é a condutividade elétrica do tecido ao redor do nó e ρ é a densidade do tecido onde foi implantado o nó sensor.

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} (W/kg) \quad (2.1)$$

Assumindo que o nó sensor tem uma antena dipolo curta de comprimento dl , a corrente de acionamento I é uniforme e varia sinusoidalmente com o tempo. O tecido ao redor do nó é homogêneo, sem bordas afiadas e superfícies ásperas. Então, o espaço ao redor da antena é dividido no campo próximo e no campo distante. A região do espaço imediatamente ao redor da antena é conhecida como o campo próximo. O limite entre o campo próximo e o campo distante é definido na distância $R = (\lambda/2\pi)$, sendo λ é o comprimento de onda de RF para comunicação sem fio. A SAR no campo próximo e distante é determinada pelas Equações 2.2 e 2.3 respectivamente.

$$SAR_{NF} = \frac{\sigma \mu \omega}{\rho \sqrt{\sigma^2 + \epsilon^2 \omega^2}} \left(\frac{I dl \sin \theta e^{-\alpha R}}{4\pi} \left(\frac{1}{R^2} + \frac{|\gamma|}{R} \right) \right)^2 \quad (2.2)$$

$$SAR_{FF} = \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{\alpha^2 + \beta^2}{\sqrt{\sigma^2 + \epsilon^2 \omega^2}} \frac{Idl}{4\pi} \right)^2 \frac{\sin^2 \theta e^{-2\alpha R}}{R^2} \quad (2.3)$$

Na equação, R é a distância entre a fonte de radiação e o ponto de observação, μ é a permeabilidade, ϵ é a permissividade relativa do tecido, ω é a frequência angular, e é o número de Euler, θ é o ângulo entre o ponto de observação e o plano $x - y$ e γ é a constante de propagação, sendo $\gamma = \alpha + j\beta$ e pode ser calculada mediante as Equações 2.4 e 2.5. Considerando que o volume de controle é bidimensional e localizado no plano $x - y$ e perpendicular à antena dipolo, então se pode assumir com segurança que o padrão de radiação é omnidirecional no plano 2D e $\sin\theta = 1$ [45], [46].

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (Nepers/m) \quad (2.4)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (rad/m) \quad (2.5)$$

Tanto a radiação no campo próximo quanto no distante contribuem para o aquecimento do tecido pela absorção da radiação, então o SAR total é a soma de SAR_{NF} e SAR_{FF} . O padrão da Comissão Federal de Comunicações (FCC) dos Estados Unidos define que o limite superior da taxa de absorção específica (SAR) para exposições ao campo eletromagnético próximo é de 1,6 W/kg para qualquer tecido com média de um grama. Enquanto a Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não-Ionizante (ICNIRP) define o limite superior de 2,0 W/kg para 10 g de tecido [36].

O calor gerado pela radiação da antena pode ser calculado a partir do SAR. O trabalho apresentado em [20] traduz os valores de SAR em aumento de temperatura, e expõe que os valores máximos de possível aumento de temperatura na cabeça humana e no cérebro são 0,31°C e 0,13°C para o padrão FCC e 0,60°C e 0,25°C para o padrão ICNIRP, respectivamente. O estudo realizado em [17] também indica que um aumento de temperatura de 0,1°C é alto o suficiente para desencadear intensas respostas termorreguladoras do corpo humano. Por isso, o aumento de temperatura é o fator mais importante no projeto de um protocolo de roteamento para WBAN.

Em [46], o aumento da temperatura é calculado usando a equação de transferência de bio-calor de Pennes apresentada na Equação 2.6, sendo ρ é a densidade do tecido, C_p é o calor específico do tecido, K é a condutividade térmica do tecido, b é a constante de

perfusão do sangue e T_b é a temperatura do sangue. Nessa equação o termo $\frac{\partial T}{\partial t}$ indica o aumento da temperatura no volume de controle, $K \nabla^2 T$ indica o calor acumulado pelo tecido, $b(T - T_b)$ representa o calor transmitido devido à condução e perfusão do sangue, ρSAR é o calor gerado pela radiação da antena, P_c indica o calor devido à dissipação de potência do nó e Q_m o calor gerado pelo metabolismo.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T - b(T - T_b) + \rho SAR + P_c + Q_m \quad (2.6)$$

Em [45] e [46] se utiliza o método numérico FDTD para discretizar a forma diferencial da equação de Pennes em tempo e espaço. Para resolver o problema da discretização, o espaço é dividido em pequenas grades e cada uma é marcada com um par de coordenadas (i, j) . A dita forma discretizada se apresenta na Equação 2.7, o termo $T^{m+1}(i, j)$ é a temperatura da grade (i, j) no tempo $m + 1$, δ_t é um intervalo de tempo discretizado e δ é o passo espacial discretizado, ou seja, o tamanho da grade. Dessa forma, a Equação 2.7 permite estimar a temperatura de cada ponto em cada instante de tempo, em função da temperatura do instante de tempo anterior.

$$T^{m+1}(i, j) = \left[1 - \frac{\delta_t b}{\rho C_p} - \frac{4\delta_t K}{\rho C_p \delta^2} \right] T^m(i, j) + \frac{\delta_t}{C_p} SAR + \frac{\delta_t b}{\rho C_p} T_b + \frac{\delta}{\rho C_p} P_c + \frac{\delta_t K}{\rho C_p \delta^2} [T^m(i + 1, j) + T^m(i, j + 1) + T^m(i - 1, j) + T^m(i, j - 1)] \quad (2.7)$$

Uma vez conhecidas as propriedades dielétricas e térmicas dos tecidos, do fluxo sanguíneo e a potência absorvida pelo tecido, a equação de Pennes pode ser utilizada para modelar o aumento de temperatura e conhecer se os efeitos do calor causariam danos aos tecidos circundantes.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Aspectos relativos ao roteamento em WBAN não estão definidos no padrão IEEE 802.15.6. Deixando o caminho livre para os pesquisadores focarem em desenvolver vários protocolos específicos para WBAN, tentando sempre atingir um ou vários dos desafios identificados em WBAN. Como resultado se tem obtido um número considerável de protocolos que foram inicialmente classificados em cinco tipos, de acordo com seus objetivos e estão estritamente relacionados com os desafios de WBAN [33], [12]. Estes grupos são categorizados como: protocolos de roteamento baseados em *cluster*, baseados em QoS, baseados em movimentos corporais, baseados na temperatura e protocolos *cross-layer*. Neste capítulo se apresenta uma abordagem de cada uma destas categorias e de cada uma delas se expõem os protocolos, que após análise da bibliografia se consideram como mais relevantes para as WBANs.

3.1 Protocolos Baseados em *cluster*

Os protocolos de roteamento baseados em *cluster* são protocolos que tentam agrupar os nós da rede em *cluster* e atribuir a um nó, chamado Cabeça de *Cluster* (CH), a missão de encaminhar dados de seus sensores de *cluster*, para o nó coordenador. Esta transmissão pode ser direta desde o nó CH até o nó coordenador ou através de outros nós CH. Estes protocolos visam minimizar o número de transmissões diretas de nós sensores para o nó coordenador. No entanto, a sobrecarga de saltos e atrasos exigidos para a seleção de clusters são as principais desvantagens desses protocolos.

O protocolo *AnyBody* foi apresentado em [48] 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 com quais nós pode-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 enlaces e o número de nós dentro da vizinhança a dois saltos (*2-hops*). Logo depois, cada nó envia uma mensagem hello3 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 CH 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 coordenador (etapa 5).

O protocolo *Hybrid Indirect Transmissions* (HIT) proposto em [11] foi desenhado para coletar dados em redes de micro sensores 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 lograr isso são usadas transmissões múltiplas tanto na comunicação entre *clusters* quanto intra-clusters. Isso é possível porque cada sensor utiliza acesso ao meio por divisão de tempo (TDMA).

O protocolo HIT consiste nas seguintes fases: (1) eleição de cabeças de *cluster*: um ou mais CHs são eleitos; (2) anúncio dos cabeças de *clusters*: os CHs transmitem seu status por toda a rede para formar um ou mais *clusters*; (3) *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 CH; (4) determinação do conjunto de bloqueio: 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 nós sensores dentro de um cluster formam rotas de vários saltos até o CH; (6) criação de cronograma TDMA: um cronograma de TDMA é calculado para permitir transmissões múltiplas; (7) transmissão de dados: é uma fase de estado estacionário longo em que os dados detectados são enviados para o nó coordenador.

De forma geral os protocolos baseados em cluster estão focados principalmente em melhorar a eficiência energética da rede, pois tentam minimizar o número de transmissões diretas de nós sensores para o nó coordenador. Por outro lado, não prestam atenção aos outros desafios de WBAN. Por isso se considera que estes protocolos não são os mais convenientes para ser utilizados nas WBAN. Também as análises de desempenho desses protocolos, nas propostas dos seus autores, são feitas comparando com outros protocolos não projetados para WBAN como LEACH [19] e PEGASIS [29].

3.2 Protocolos Baseados em Qualidade de Serviço

Os protocolos baseados em QoS fornecem principalmente módulos separados para diferentes métricas de QoS que operam de maneira coordenada. Assim, eles fornecem 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 *Thermal-Aware QoS Routing Protocol* (TLQoS) proposto em [31]. Este é um protocolo de encaminhamento 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 métricas de QoS se classifica o tráfego em quatro tipos: crítico (*Critical Traffic*), com restrição de atraso (*Delay Constrained Traffic*), com restrição de confiabilidade (*Reliability Constrained Traffic*) e 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 os pacotes regulares (sem restrições de atraso e confiabilidade) e garante que o pacote alcance o coordenador 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.

O protocolo *Data-centric Multi-objective QoS-aware Routing* (DMQoS) proposto em [40] foi apresentado como o primeiro desenho completo de um protocolo de roteamento multi-objetivo centrado em QoS para WBAN. Reduz o custo de energia e o *overhead* de operação do protocolo, melhorando o desempenho da rede. Está baseado em uma arquitetura modular e utiliza localizações geográficas para implementar o roteamento localizado. Realiza o encaminhamento 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 (OP),

pacotes de dados controlados por confiabilidade (RP), pacotes de dados controlados por atraso (DP) e pacotes de dados críticos (CP).

A arquitetura de roteamento do DMQoS está constituída por cinco módulos: (1) classificador de pacote dinâmico, recebe os pacotes de dados e os classifica em uma das quatro categorias supracitadas e logo são encaminhados para seus respectivos módulos; (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; (3) módulo de controle de confiabilidade, determina o próximo salto com maior confiabilidade; (4) O módulo de controle de atraso, localiza o próximo salto com menos atraso; (5) O módulo de enfileiramento baseado em QoS, é responsável por encaminhar o pacote de dados recebido com base nas prioridades atribuídas. Baseado nessa arquitetura, os nós sensores enviam os dados detectados para o nó coordenador.

O protocolo *Energy-aware Peering Routing* (EPR) proposto em [22] é um protocolo que embora esteja dentro da classificação 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. Nesta proposta, os autores propõem uma nova arquitetura de rede WBAN 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, com base em abordagens centralizadas e distribuídas.

Nesta proposta, na hora de encaminhar os dados, para selecionar o nó do próximo salto considerando 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 como na tabela de vizinhos podem existir vários registros para uma mesma entrada, é considerado 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 *QoS-aware Peering Routing protocol for Delay sensitive data* (QPRD) proposto em [23] tenta melhorar o 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) e Pacotes Sensíveis ao Atraso (DSP). QPRD, diferente de DMQoS, tem a arquitetura de encaminhamento dividida em sete módulos: (1) receptor MAC, re-

cebe os pacotes de dados dos outros nós; (2) classificador de pacote, 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 os pacotes HELLO; (5) módulo de serviço de encaminhamento, 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 FCFS e os transmite usando CSMA/CA.

Outro protocolo projetado para melhorar o EPR é o protocolo *QoS aware Peering Routing protocol for Reliability sensitive data* (QPRR) proposto em [24]. Particularmente este foca-se em melhorar a confiabilidade fim-a-fim, para satisfazer a necessidade dos dados sensíveis à confiabilidade. Para isso se classificam os dados como Pacotes Ordinários (OP) e Pacotes Sensíveis à Confiabilidade (RSP). A arquitetura de encaminhamento 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 é responsável por monitorar e calcular a confiabilidade do enlace entre dois nós.

O protocolo DMQoS é um dos mais conhecidos dos protocolos cientes de QoS, porque pode diminuir o atraso para informações sensíveis temporalmente e, da mesma forma, pode fornecer roteamento confiável quando necessário. Porém, os protocolos EPR, QPRD e QPRR têm menos consumo de energia quando comparados com outros protocolos de seu tipo. Apesar disso, esses protocolos não apresentam soluções eficientes para lidar com a mobilidade do corpo.

3.3 Protocolos Baseados em Movimentos Corporais

Características de WBAN como baixas potências de transmissão para evitar o aquecimento dos tecidos e poupar energia, unido aos movimentos do corpo humano, criam um cenário onde pode acontecer perdas dos enlaces e mudanças temporais na topologia da rede. Os protocolos baseados em movimentos corporais tentam enfrentar esse problema de particionamento topológico ou desconexão dos enlaces, causado pelo movimento corporal. Em [5] são abordados 6 protocolos projetados com este fim, deles os dois com melhor desempenho nos cenários WBANs são o protocolo de roteamento oportunista (*Opportu-*

nistic routing) proposto em [30] e o protocolo *Energy Efficient Thermal and Power Aware Routing* (ETPA) apresentado em [32].

O protocolo de roteamento oportunista foi projetado para aumentar a vida útil da rede a partir do movimento das partes do corpo. Nas WBANs, o nó coordenador é o dispositivo de maior consumo energético, por isso os autores indicam que seja alocado em uma parte do corpo de forma não invasiva, permitindo que a bateria possa ser trocada facilmente. Neste protocolo, se propõe um modelo de rede, no qual o nó coordenador é alocado no pulso. Outra vantagem dessa alocação do nó coordenador é evitar altas atenuações do sinal de RF, que em algumas direções seriam totalmente mascaradas pelo corpo. Por outra parte o nó sensor está localizado no tórax e envia periodicamente dados do corpo para uma rede externa através do nó coordenador. Também se propõe usar um nó retransmissor ao lado da cintura, de forma que nessa posição tenha linha de visão (LOS) com o sensor de tórax e o nó coordenador.

Quando o nó sensor deseja enviar um pacote de dados ao coordenador, em primeiro lugar, envia um sinal RTS (*Request To Send*). Este é enviado com um nível de potência que apenas nós na linha de visão podem receber. Se o nó da mão (coordenador) estiver na posição LOS, ele envia um sinal ACK de volta ao nó sensor dentro de um intervalo de tempo limite especificado. Então, o nó sensor envia seu pacote diretamente para o coordenador. No entanto, se não existe LOS, o nó coordenador não recebe o sinal RTS e, subsequentemente, o nó sensor não receberá um sinal ACK do coordenador no intervalo de tempo limite. Depois que o tempo limite é passado, o nó sensor envia um sinal de ativação para o nó retransmissor que só tem o receptor ligado.

Quando o nó retransmissor estiver pronto, ele envia um sinal para o nó sensor e o nó coordenador para iniciar a comunicação e, em seguida, retransmite os dados do sensor no peito para o nó coordenador alocado na mão. No final da comunicação, o nó coordenador enviará uma confirmação de recebimento (RACK) 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 ligação com o coordenador 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 apresentado em [32] foi desenhado principalmente com o fim de evitar superaquecimento dos nós. Este protocolo alcança o maior índice de entrega de pacotes em comparação com os outros da mesma classificação. Embora considere os ní-

veis de energia e a temperatura dos nós no cálculo da função de custo, é uma abordagem baseada no movimento do corpo humano, já que é baseado no esquema de roteamento definido no protocolo PRPLC apresentado em [38]. Nesse trabalho o impacto da mobilidade da postura humana no particionamento da rede, se considera a partir do Fator de Verossimilhança do Enlace (LLF), o qual informa sobre a probabilidade de conexão entre dois nós por um intervalo de tempo discreto “ t ”. Dessa forma a filosofia de roteamento é de natureza probabilística.

A proposta considera uma 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 *Time Division Multiple Access* (TDMA). 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 enviar um pacote, ele procura por uma rota eficiente com custo mínimo. Se encontra nós com uma rota eficiente, ele encaminha o pacote, caso contrário, ele armazena o pacote em um buffer. Caso não 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. Para diminuir o atraso, cada pacote só pode passar por um número de saltos máximo predefinido, caso contrário ele é descartado.

3.4 Protocolos 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 encaminhar dados utilizando 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 [33], [36], foram propostos seguindo esta abordagem, mas não incluem métricas de qualidade de rede. Atualmente esta abordagem está presente apenas de forma combinada com outras abordagens.

O primeiro protocolo que introduziu a temperatura como uma métrica de roteamento foi *Thermal-Aware Routing Algorithm* (TARA) [46]. Propostas posteriores como *Least Temperature Routing* (LTR) [3], *Adaptive Least Temperature Routing* (ALTR) [3]

e *Hotspot Preventing Routing* (HPR) [4], foram projetadas para melhorar TARA. Desse protocolos, o HPR está entre os de melhor desempenho para redes WBAN. Outro protocolo baseado na temperatura com bons resultados frente aos desafios de WBAN é o *Multi-Mode Energy-Efficient Multihop Protocol* (M²E²) proposto em [39].

TARA basicamente tenta evitar pontos quentes observando a temperatura dos nós vizinhos e desviar o pacote usando uma estratégia de retirada. Esta proposta considera duas fontes de calor principais: radiação de antena e dissipação de energia do circuito do nó. No entanto, como os nós devem ser o mais simples possível, presume-se que não haja sensor de temperatura dentro do nó para medir a temperatura. Portanto, a temperatura é estimada observando as atividades do sensor, a radiação da antena e a dissipação de energia do circuito do nó. A estimativa da temperatura é calculada utilizando o modelo de transferência de bio-calor de Pennes [46], conforme explicado na Seção 2.5.

TARA considera uma primeira fase de configuração, onde cada nó troca informações de vizinhança, cria sua própria lista de vizinhos e coleta informações do número de salto, para que cada nó saiba como alcançar o nó coordenador. Em uma segunda fase de encaminhamento de dados, os nós que tiverem dados a enviar encaminharão o pacote para o próximo salto, até atingir o nó coordenador. Um nó cuja temperatura excede um valor de limite predefinido é marcado como um ponto quente. Quando um pacote tem como destino um nó identificado com ponto quente, será armazenado em um buffer até que a temperatura estimada caia. Se o período do pacote em buffer exceder o período de tempo limite, o pacote é descartado.

Quando o nó marcado como ponto quente é um nó intermediário, o pacote é roteado por um caminho diferente. Para isso é utilizada a estratégia de retirada. Se o nó do próximo salto é um ponto quente, o nó verifica no conjunto de encaminhamento dessa rota se há disponível outro nó de próximo salto para enviar o pacote. Se não houver, o pacote será encaminhado de volta para o nó anterior. Esse nó anterior tenta encaminhar o pacote usando um caminho alternativo ou pode encaminhá-lo novamente para seu nó anterior. As informações sobre os pontos quentes são transportadas pelo pacote quando a estratégia de retirada é usada. O mecanismo de TARA reduz o aumento médio da temperatura da rede e limita a temperatura máxima ao valor limite predefinido, além de equilibrar a carga na rede. No entanto, a estratégia de retirada introduz um alto atraso, porque o pacote será desviado arbitrariamente usando outra rota, desde que haja um nó disponível para o próximo salto.

HPR evita a formação de pontos quentes na rede e também impede que o pacote

tome caminhos sub-ótimos e, assim, reduz o atraso médio da rede. Ele 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, primeiro os nós usam o algoritmo de salto mais curto, desde que nenhum ponto quente apareça no caminho. Os pontos quentes na rede são determinados dinamicamente usando um valor limite que é derivado da temperatura média dos nós vizinhos e da própria temperatura dos nós. Se a temperatura do nó do próximo salto excede a soma da temperatura do nó emissor e do limite, o pacote é enviado a outro nó vizinho com menor temperatura e que não tenha sido visitado pelo pacote, para evitar *loops* de roteamento, é usado um contador de saltos com um limite predefinido.

O protocolo M²E² além de reduzir os pontos quentes em WBAN heterogêneas, também reduz o consumo de energia e aumenta o tempo de vida da rede. Este protocolo é o melhor entre todos os protocolos de reconhecimento térmico. Neste protocolo se considera um protótipo de rede no qual um nó coordenador está localizado no centro do corpo humano e o outro está localizado no domicílio. Para enfrentar os inconvenientes de WBAN heterogêneas, os nós sensores são organizados no corpo humano com base em sua taxa de dados.

Nesse trabalho, 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 coordenador no corpo. Os outros sensores de baixas taxas, chamados nós filhos, alocados nas partes do corpo com maior movimento, podem se comunicar diretamente ao coordenador ou através de outros nós filhos em enlaces multissalto. Por outro lado, os nós alocados no domicílio 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 salto múltiplo. 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 coordenador 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 no domicílio. Nesse caso, se utiliza 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. Para reduzir a perda de energia, é usada a comunicação multissalto para dados normais, mas para dados de emergência, todos os nós sensores implantados no corpo enviarão dados diretamente para o nó coordenador; (3) fase de agendamento, após a seleção da rota na fase de roteamento, o nó coordenador programa um intervalo de tempo para a comunicação entre o coordenador e os nós raiz com base no TDMA; (4) fase de transmissão de dados: os nós sensores enviam seus dados para o nó coordenador no intervalo de tempo designado.

3.5 Protocolos Cross-Layer

Os protocolos de roteamento *cross-layer* abordam e tentam resolver 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 [33], eles não podem fornecer alto desempenho em casos de movimento do corpo e elevadas perdas de propagação em alguns cenários.

O protocolo *Cascading Information retrieval by Controlling Access with Distributed slot Assignment* (CICADA), proposto em [27], foi projetado com o fim de introduzir menos atrasos e baixo consumo de energia. Esse protocolo oferece melhor desempenho em respeito a essas métricas, dentre os de sua classificação. Nele é configurada uma árvore de rede 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 coordenador. O uso de energia é baixo, pois foi projetado com base em agendamento TDMA, e os nós podem dormir nos intervalos de tempo onde não estão transmitindo ou recebendo.

A alocação de intervalos 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 intervalos: o esquema de controle e o esquema de dados, respectivamente. 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 o ciclo de dados.

O esquema de dados consiste em duas 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 intervalos necessários para transmitir os dados ao nó pai e o número de intervalos necessários para receber os dados de seus nós filhos. Cada subciclo de dados tem um intervalo para que novos nós possam entrar na árvore, para isso cada novo nó filho tem permissão para enviar uma mensagem de solicitação de união à árvore (*Join-Request*) nesse intervalo depois de ouvir o esquema de dados do nó pai desejado.

O protocolo *TImezone COordinated Sleep Scheduling* (TICOSS), proposto em [42], procura melhorar o padrão 802.15.4 através da divisão da rede em zonas de tempo (*time-zones*). Para otimizar o padrão 802.15.4, os nós usam períodos alternados de atividade e inatividade para reduzir o consumo de energia, reduz as colisões de pacotes ocorridas devido aos nós ocultos, e facilita os nós a encaminhar os pacotes de dados para o nó coordenador usando o roteamento de caminho mais curto. A ideia de dividir a rede em *time-zones* 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 intervalos que são usados para transmitir os pacotes dos buffers.

3.6 Conclusões do capítulo

No estudo bibliográfico realizado, não foi encontrado um protocolo de roteamento que execute a escolha de nós retransmissores com base na qualidade dos enlaces, para um cenário de comunicação intra-WBAN, evitando o superaquecimento de nós intermediários. Em propostas como os protocolos *Two-Hop* e LAEEBA, o nó intermediário é escolhido com base na energia residual. Na presente dissertação, se propõe um mecanismo de roteamento para enfrentar perdas de caminho com base na qualidade do enlace, evitando o aquecimento de nós retransmissores e tratando eventuais particionamentos topológicos resultantes da movimentação do corpo.

Capítulo 4

Proposta

Neste capítulo, é apresentado o protocolo LATOR (*Link-Quality Aware and Thermal Aware On-Demand Routing*) [8, 9] como uma proposta de protocolo para roteamento em WBAN com base na qualidade dos enlaces e com prevenção do aquecimento dos nós. Primeiramente, é apresentado o mecanismo para coletar a informação de qualidade dos enlaces durante o processo de descoberta de rota e as ações a tomar em caso de perda do enlace ou aquecimento dos nós. Depois, se descrevem as diferentes mensagens utilizadas e a estrutura e funcionalidade da Tabela de Roteamento (RT). Se expõe como são geradas e processadas as diferentes mensagens de controle e dados na rede.

4.1 Protocolo LATOR

O protocolo LATOR visa melhorar o PDR quando a comunicação direta entre nós sensores e o nó coordenador tem baixa qualidade, além de evitar o aquecimento dos nós intermediários. A proposta é projetada considerando duas informações principais: a informação de qualidade dos enlaces que formam a rota e a temperatura dos nós. Baseado na qualidade dos enlaces pretende-se melhorar o PDR, enquanto a temperatura é considerada para evitar o aquecimento.

LATOR utiliza a abordagem reativa para evitar muito tráfego de controle. É inspirado no protocolo AODV [37] e executa uma fase de descoberta de rota e uma de manutenção. Na fase de descoberta, são trocadas mensagens de Pedido de Rota (RREQ) e Resposta de Rota (RREP). Na fase de manutenção de rota, são trocadas mensagens de Erro de Rota (RERR) e de HELLO, cujo principal objetivo é notificar aos nós sensores da quebra do enlace ou do aquecimento. Uma vez executada a descoberta de rota com sucesso, mensagens de dados (DATA) podem ser encaminhadas para o nó coordenador. Na Seção

4.2, se apresentam os formatos das mensagens de controle e de dados utilizadas pelo protocolo LATOR; nas Seções 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 se descreve o processamento das mensagens RREQ, RREP, HELLO, RERR e DATA respectivamente.

A ideia geral da proposta consiste em coletar Informação da Qualidade dos Enlaces (LQI), durante o processo de descoberta de rota. Depois, o nó fonte e nós intermediários usarão métricas baseadas nessa informação de qualidade para o encaminhamento dos dados até o nó coordenador. Simultaneamente cada nó tem conhecimento do comportamento da sua própria temperatura e esse valor de temperatura é verificado sempre que se processa um pacote, para tomar ações com o fim de evitar o aquecimento. Essas ações são detalhadas nas Seções 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

A qualidade dos enlaces no sentido coordenador - sensor (*downstream*) e sensor - coordenador (*upstream*) nem sempre são iguais. Então a informação de qualidade do enlace que resulta de interesse para esta proposta é no sentido sensor - coordenador, pois, nesse sentido, os nós sensores enviam os dados das medições para o nó coordenador. Então, o foco deste trabalho é melhorar o desempenho na comunicação *upstream*.

Nesse trabalho, para a comunicação *downstream* não foi projetado o roteamento baseado na qualidade dos enlaces. O nó coordenador transmite com uma potencia maior comparada com os nó sensores; assim, os nós sensores podem escutar os beacon necessários para o agendamento na camada MAC. Então, prevê-se que a comunicação entre o coordenador e os nós sensores atuadores em *downstream* é realizada utilizando a comunicação direta.

Por outro lado, é necessário que o nó sensor tenha conhecimento do LQI de cada salto que compõe cada rota até o nó coordenador. Então, são necessários campos específicos para salvá-la na tabela de rota e transportá-la nas mensagens. Na mensagem RREP, um campo RREP_LQI_List transporta a lista de LQI dos enlaces, quando se transmite para o nó sensor fonte. Na entrada da RT, o campo RT_LQI_List armazena a informação de qualidade dos enlaces; podendo conter a lista de LQI até o nó coordenador ou o LQI do enlace do próximo salto no caminho reverso até o nó fonte, dependendo do tipo de mensagem que criou ou atualizou a entrada na RT. Na Seção 4.2.2 é apresentada a estrutura da mensagem RREP e na Seção 4.3 é detalhada a estrutura da tabela de rota.

A prevenção do aquecimento se baseia no controle de atividade do nó, em relação ao aumento da temperatura que experimenta o nó como causa da sua atividade. No LATOR, cada nó mede sua própria temperatura. Então, o aumento de temperatura é calculado e comparado com um valor máximo de aumento da temperatura permitido (Temp_Limiar1)

a partir do qual considera-se que o nó está superaquecido. Então, um nó nesse estado não realiza nenhuma transmissão e entra em um estado de baixo consumo onde se descarta toda mensagem RREQ, RREP ou DATA recebida; as mensagens HELLO são processadas; quando são recebidas as mensagens RERR, as entradas afetadas são desativadas na RT.

Quando um nó sensor quer enviar para o nó coordenador uma mensagem DATA recebida da sua camada de aplicação, se não está superaquecido, o pacote DATA é processado. Caso contrário, o pacote é armazenado em um buffer até que sua temperatura alcance um valor abaixo do valor `Temp_Limiar1` definido. Se um nó intermediário entra no estado de superaquecido, envia uma mensagem RERR para todos os nós precursores de suas entradas na RT; notificando de uma falha na rota. O RERR não especifica se a falha é causada pela quebra de um enlace ou pelo aquecimento de um nó. Mas é suficiente para que os nós precursores, entre eles o nó sensor fonte, desativem as entradas na sua RT que têm como próximo salto o nó superaquecido que enviou a mensagem RERR.

No LATOR, um nó no estado de baixo consumo começa a diminuir sua temperatura. Então um nó pode atuar novamente como intermediário e retomar o processamento normal das mensagens RREQ, RREP, RERR e DATA, uma vez que sua temperatura é menor que o valor de um segundo limiar (`Temp_Limiar2`). Sendo que o valor de `Temp_Limiar2` é menor do que o limite de temperatura máximo permissível. Dessa forma, é garantido que o nó não seja utilizado imediatamente depois de sair do estado de superaquecimento, já que isso o faria voltar novamente ao estado de superaquecimento e afetaria a transmissão dos dados da camada de aplicação do próprio nó.

4.1.1 Descoberta de Rota do Protocolo LATOR

A descoberta de rota no LATOR é ilustrada na Figura 4.1. Esta fase é ativada quando um nó sensor fonte (S) precisa enviar algum dado para o nó coordenador (D) e não tem uma rota disponível na sua RT. A primeira ação que executa o nó sensor fonte é criar uma mensagem RREQ segundo se explica na Seção 4.4. Logo depois essa mensagem é transmitida em *broadcast* pela rede. A Figura 4.1(a) mostra a disseminação do RREQ pela rede. Uma vez que as mensagens RREQs são descartadas pelo nó superaquecido, ele não participa da descoberta de rota que está em execução. Dessa forma, é escolhida uma rota que não tem nenhum nó superaquecido. Por exemplo, o nó H da Figura 4.1(a) descarta o RREQ recebido porque está superaquecido.

Para evitar *loops* na rede, cada nó sensor que recebe o RREQ verifica se ele já tinha recebido e processado anteriormente alguma mensagem RREQ com o mesmo identificador

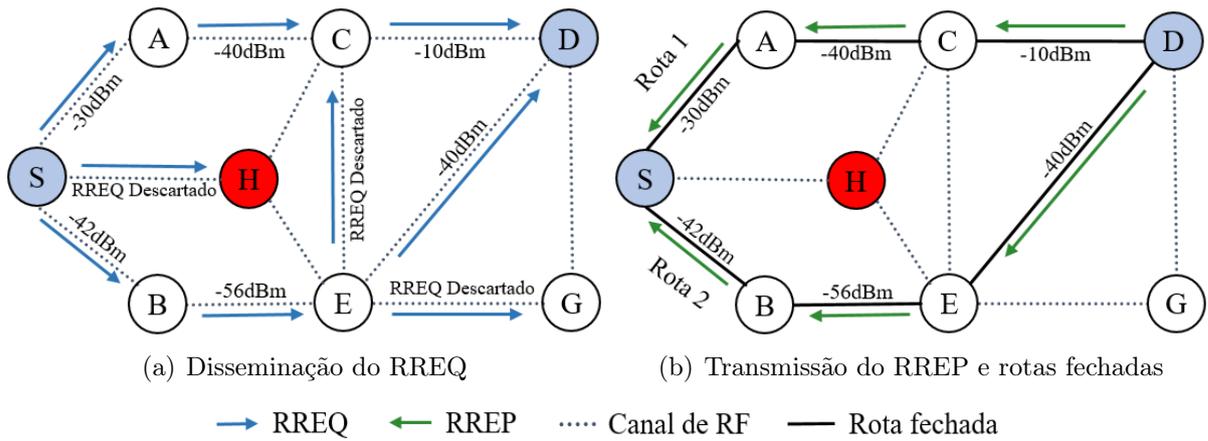


Figura 4.1: Processo de descoberta de rota de LATOR.

de RREQ (RREQ_ID) e o mesmo endereço de origem (RREQ_Source_Add). Se foi anteriormente recebido, o pacote é descartado, conforme ocorre com o nó C da Figura 4.1(a). Caso contrário, se o nó que recebe o RREQ não é o destino e não tem disponível na sua RT uma entrada válida para o nó coordenador, ele retransmite o RREQ em *broadcast*. Se o nó que recebe o RREQ é o nó coordenador ou é um nó que tem armazenado na sua RT uma entrada válida para o coordenador com Número de Sequência de Destino (DSN) maior ou igual ao DSN contido no pacote RREQ, o nó responde com uma mensagem RREP.

LATOR considera um número máximo de saltos para uma rota. Na mensagem RREQ um campo contador de saltos é incrementado sempre que é recebido. Quando um nó sensor recebe um RREQ, primeiramente incrementa o contador de saltos. Se após ser incrementado, seu valor for menor que o número de saltos máximo permitidos, se continua com o processamento da mensagem; caso contrário é descartado. Por exemplo na Figura 4.1(a), onde considera-se que cada rota vai ter no máximo três saltos, o nó G descarta o RREQ recebido, porque o contador de saltos atingiu o máximo valor permitido. Se o nó sensor que recebeu o RREQ tem na sua RT uma rota ativa para o nó coordenador, só vai responder à solicitação se a soma do contador de salto no RREQ e o número de saltos da rota na RT for menor ou igual ao número máximo de saltos permitidos. Na Seção 4.4 se expõe em detalhes o processamento da mensagem RREQ.

Na Figura 4.2 se mostra com mais detalhes a disseminação do RREQ pela rede. A coleta do LQI é realizada durante a disseminação do RREQ. Por exemplo no caminho S-A-C-D apresentado na figura, o nó A recebe o RREQ transmitido pelo nó S, ele cria uma entrada em sua RT para o nó S e armazena o LQI do enlace S-A (-30 dBm). Depois disso, o nó transmite o RREQ em *broadcast*, que é recebido pelo nó C. Essas etapas são

repetidas até que o RREQ atinja o nó coordenador D, que responde a solicitação com um RREP.

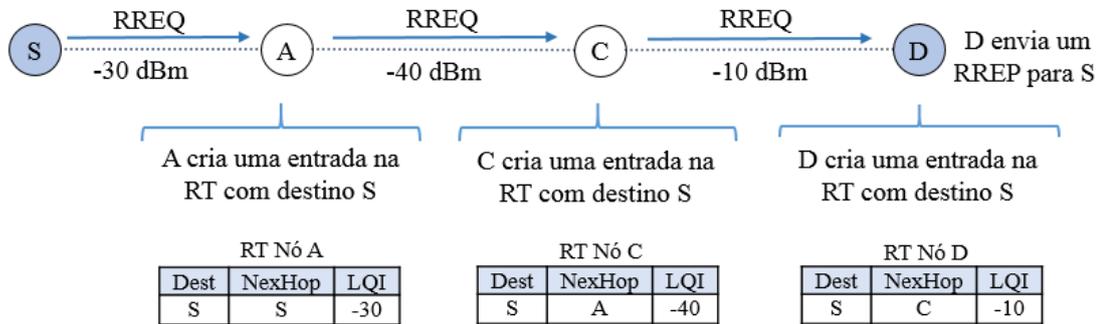


Figura 4.2: Disseminação do RREQ pela rede.

Em LATOR, o nó coordenador responde todos os RREQs que chegam até ele por diferentes caminhos, incluindo os duplicados de uma mesma solicitação de rota. Como se pode ver na Figura 4.1(b), o RREQ enviado pelo nó S alcançou o nó D por dois caminhos diferentes, então duas respostas são geradas e enviadas em *unicast* para o nó S pelo caminho reverso. Enquanto o RREP percorre o caminho reverso até o nó sensor fonte, cada nó intermediário cria uma nova entrada para o nó coordenador indicando a lista de LQI da rota recebida no RREP. Logo, essa lista de LQI é atualizada adicionando o LQI que foi armazenado anteriormente na RT durante o processamento do RREQ e logo depois é enviada para o próximo salto no caminho reverso.

Por exemplo, na transmissão do RREP pelo caminho reverso correspondente à rota S-A-C-D, mostrada na Figura 4.3, o nó C recebe um RREP enviado pelo nó D com a lista de LQI (-10dBm) correspondente ao enlace C-D. O nó C cria uma nova entrada na RT para o coordenador indicando a lista de LQI recebida no RREP (-10dBm). A lista de LQI é atualizada com o valor de LQI do seguinte salto no caminho reverso (-40dBm). Depois disso, o RREP é transmitido para o próximo salto, transportando a lista de LQI (-40dBm, -10dBm). Esse processo é repetido até que o RREP atinja o nó sensor que gerou a solicitação. Dessa forma o nó S recebe a lista de LQI (-30dBm, -40dBm, -10dBm) com a informação de qualidade dos enlaces S-A, A-C e C-D. De forma similar pelo caminho S-B-E-D mostrado na Figura 4.1(b), é transmitido outro RREP à mesma solicitação. Dessa forma, o nó S tem dois caminhos possíveis para transmitir para o nó coordenador. Na Seção 4.5 se descreve com detalhes o processamento da mensagem RREPs na rede.

Na descoberta de rota, o nó sensor fonte deve esperar um tempo T_D suficiente para receber todas as respostas enviadas pelo nó coordenador à mesma solicitação recebida. Então, cada nó contém um temporizador (*timer*) que é inicializado com o valor T_D no

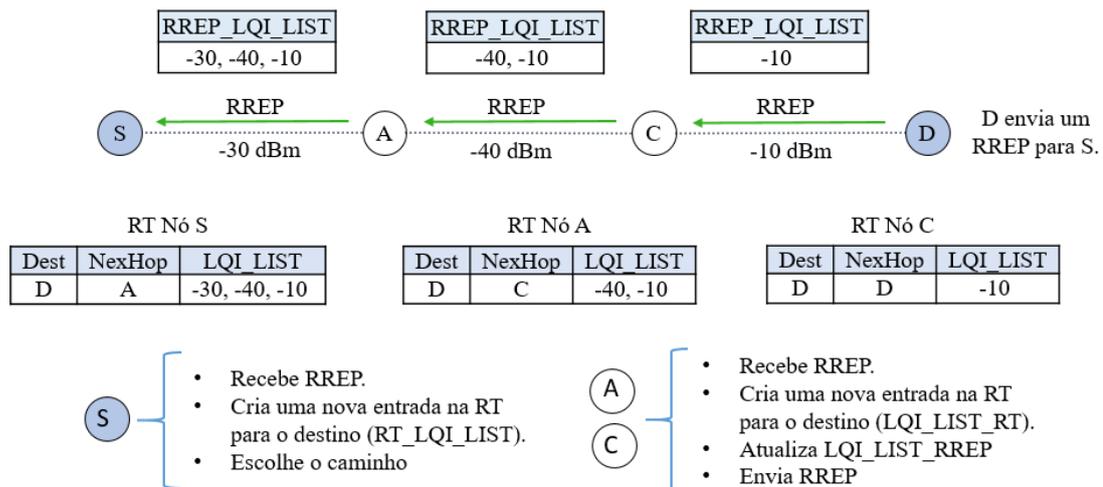


Figura 4.3: Envio e processamento do RREP.

instante que é iniciada a descoberta de rota. Enquanto a descoberta de rota está em execução, todos os dados recebidos da camada de aplicação são alocados em um buffer de dados e só poderão ser enviados para o nó coordenador se uma rota é estabelecida em até $Attempt_D$ tentativas consecutivas de descoberta de rota. Para isso, em cada tentativa de descoberta de rota em que expira o temporizador, se foi encontrada uma rota, é processado o buffer de dados, e os dados são encaminhados para o nó coordenador.

4.1.2 Manutenção de Rota e Reroteamento

Uma vez que uma rota é estabelecida e está sendo utilizada para encaminhar os dados para o nó coordenador, pode acontecer a perda de algum enlace da rota pelo movimento do corpo. Nesse caso, se o nó fonte continua enviando dados para o coordenador utilizando essa rota, os dados serão perdidos. Para evitar isso é preciso atualizar as entradas nas tabelas de rotas, mas primeiro se deve notificar da ocorrência de perda do enlace. Para conhecer sobre a conectividade dos nós vizinhos, cada nó envia periodicamente por difusão mensagens HELLO com sua identidade. A troca de mensagens HELLO é utilizada de forma similar ao protocolo AODV. Com ela, os vizinhos atualizam sua informação de conectividade local. A mensagem HELLO será enviada apenas pelos nós que formam parte de uma rota ativa indicando o tempo de vida do pacote de um salto. Dessa forma o próximo salto no caminho reverso recebe informação de conectividade local. Se ao menos HELLO_LOSS_ALLOWED mensagens HELLO consecutivas não são recebidas, considera-se que há quebra do enlace. Neste caso, é preciso informar ao nó sensor fonte da quebra do enlace. Também todos os nós que dependem da rota falha são informados. Na Seção 4.6 se apresentam a geração e processamento da mensagem HELLO.

Os pacotes no buffer de dados também são transmitidos depois de alcançar o tempo máximo de espera para a descoberta de rotas. Se durante a transmissão dos pacotes armazenados no buffer, é recebido um pacote da camada de aplicação, esse pacote também é armazenado no buffer de dados. Dessa forma, como trata-se de um buffer FIFO, é garantida a transmissão dos pacotes de forma ordenada. Depois de enviar os pacotes do buffer de dados, o nó retorna para o estado nó aquecido, se sua temperatura ainda é maior ou igual que Limiar2. Caso sua temperatura for menor que Limiar2 o nó passa para o estado nó não aquecido.

Quando o nó está no estado nó não aquecido e recebe qualquer pacote passa ao estado processando pacote. Este estado é apresentado na Figura 4.6 e são apresentados os diferentes subestados e transições para o processamento de cada pacote segundo foi mencionado nas seções anteriores. Uma vez que finaliza o processamento de cada pacote recebido, o nó retorna ao estado não aquecido. Exceto no momento em que finaliza o processo de descoberta de rota com sucesso, no qual primeiramente são transmitidos os pacotes no buffer de dados.

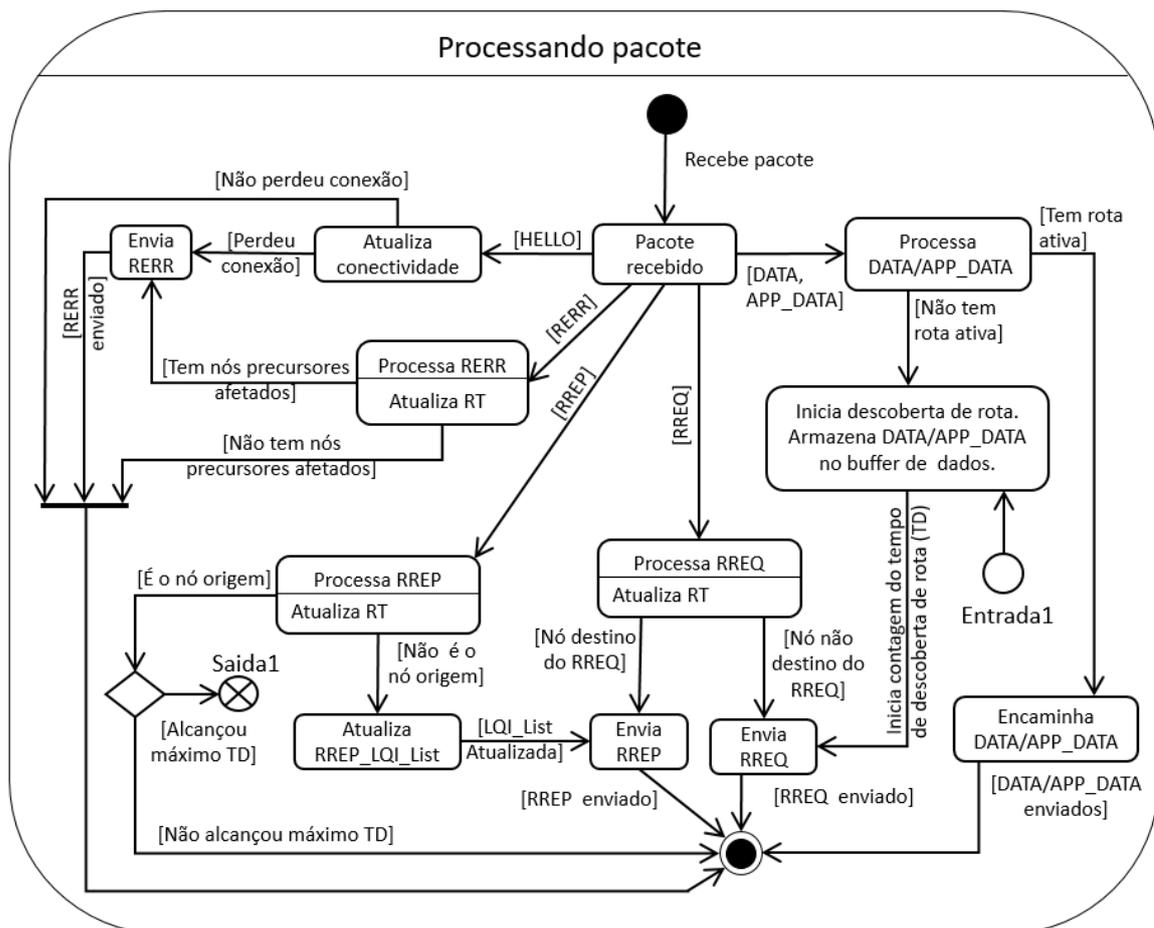


Figura 4.6: Diagrama detalhado do bloco processando pacote.

4.1.4 Critérios para a seleção de rotas

Na seleção da rota até o nó coordenador, a melhor rota é aquela que tenha todos os saltos com boa qualidade, mas isso nem sempre acontece. Pode existir um caminho de boa qualidade onde um único salto seja o suficientemente ruim para causar grandes perdas de pacotes. Por isso é importante, além do valor da informação de qualidade do enlace para cada salto, considerar a variabilidade desses valores. Para decidir qual caminho escolher em função do LQI, este trabalho analisou três possíveis variantes:

1. Rota com o maior LQI mínimo (Max-Min). Este método determina o menor LQI para cada rota disponível até o destino. Esses valores são guardados temporariamente em uma lista, e deles é selecionado o maior LQI mínimo. Dessa forma é selecionado o maior valor de LQI, entre os menores valores de LQI de cada rota. Depois, a rota que corresponde ao LQI_Max-Min é escolhida para o encaminhamento dos dados.
2. Rota com o menor coeficiente de variação (Min-CV) do LQI. Para cada rota disponível até o destino, o coeficiente de variação do LQI é determinado. Depois é selecionada a rota que tem menor coeficiente de variação do LQI.
3. Rota com a maior média (Max-Avg) de LQI. Com esta variante se determina o valor médio dos valores de LQI das rotas válidas para o destino. Então a rota que tem maior média de LQI é selecionada.

4.2 Formatos das mensagens do protocolo LATOR

Todas as mensagens utilizadas estão organizadas como uma sequência campos e *flags*. Para uma melhor visualização, nesta dissertação são representadas de forma retangular, conforme se apresentam nas seguintes seções. As mensagens são transmitidas seguindo a ordem: de esquerda à direita e de cima para baixo. Os formatos das mensagens foram definidos tomando como referência as mensagens do protocolo AODV.

4.2.1 Mensagem RREQ

O formato da mensagem RREQ se apresenta na Tabela 4.1 e está formado por 7 campos e um *flag*. A funcionalidade de cada um é a seguinte:

Tabela 4.1: Formato da mensagem RREQ.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
RREQ_Type								D	RREQ_Reserved														RREQ_HopCount								
RREQ_ID																															
RREQ_Dest_Add																															
RREQ_DSN																															
RREQ_Source_Add																															
RREQ_OSN																															

- RREQ_Type: campo tipo de mensagem. Contém o identificador correspondente à mensagem RREQ.
- D: *flag* de somente destino responde. Quando este *flag* está ativo indica que só o destino pode responder o RREQ. Quando está desativado, qualquer nó intermediário que tem uma rota ativa para alcançar o nó coordenador pode responder o RREQ.
- RREQ_Reserved: bits reservados para uso futuro. São enviados com valor zero e ignorados na recepção do RREQ.
- RREQ_HopCount: campo contador de saltos. Contém o número de saltos dado pelo RREQ durante a sua disseminação na rede. Em cada salto, é incrementado em um.
- RREQ_ID: campo identificador do RREQ. É um número sequencial que identifica exclusivamente um RREQ criado por um nó. Cada nó que cria um RREQ incrementa seu identificador em um. Esse identificador junto com o endereço do nó que cria o RREQ formam uma combinação única na rede.
- RREQ_Dest_Add: campo endereço do destino. Contém o endereço do nó destino para o qual a rota é solicitada (nó coordenador).
- RREQ_DSN: campo Número de Sequência de Destino, *Destination Sequence Number* (DSN). Contém o último número de sequência conhecido do nó para o qual a rota é solicitada (nó coordenador). Se não é conhecido o DSN, se atribui o valor zero.

- RREQ_Source_Add: campo endereço do origem. Contém o endereço do nó que originou o pedido de rota.
- RREQ_OSN: campo Número de Sequência do Originador, *Originator Sequence Number* (OSN). Contém o número de sequência atualizado do nó que originou o pedido de rota.

4.2.2 Mensagem RREP

O formato da mensagem RREP se apresenta na Tabela 4.2 e está formado por 7 campos. A funcionalidade de cada um é a seguinte:

Tabela 4.2: Formato da mensagem RREP.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
RREP_Type				RREP_Reserved												RREP_HopCount															
RREP_Dest_Add																															
RREP_DSN																															
RREP_Source_Add																															
RREP_LifeTime																															
RREP_LQI_List																															

- RREP_Type: campo tipo de mensagem. Contém o identificador correspondente à mensagem RREP.
- RREP_Reserved: bits reservados para uso futuro. São enviados com valor zero e ignorados na recepção do RREP.
- RREP_HopCount: campo contador de saltos. Contém a distância, em saltos, para alcançar o nó coordenador.
- RREP_Dest_Add: campo endereço do destino. Contém o endereço do destino para o qual a rota é fornecida (nó coordenador).
- RREP_DSN: campo Número de Sequência de Destino (DSN). Contém o número de sequência do nó para o qual a rota é fornecida (nó coordenador).

- RREP_Source_Add: campo endereço do origem. Contém o endereço do nó que originou o RREQ, para o qual a rota é fornecida.
- RREP_LifeTime: campo tempo de vida. Contém o tempo em milissegundos para o qual os nós que recebem o RREP consideram a rota para o coordenador como válida.
- RREP_LQI_List: campo de informação de qualidade dos enlaces. Contém o valor da qualidade de cada enlace que forma parte da rota para alcançar o nó coordenador.

4.2.3 Mensagem RERR

O formato da mensagem RERR se apresenta na Tabela 4.3 e está formada por 4 campos. A funcionalidade de cada um é a seguinte:

Tabela 4.3: Formato da mensagem RERR.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
RERR_Type				RERR_Reserved												RERR_NumAffectedDest															
				RERR_AffectedDest_Add (1)																											
				RERR_AffectedDest_DSN (1)																											

				RERR_AffectedDest_Add (N)																											
				RERR_AffectedDest_DSN (N)																											

- RERR_Type: campo tipo de mensagem. Contém o identificador correspondente à mensagem RERR.
- RERR_Reserved: bits reservados para uso futuro. São enviados com valor zero e ignorados na recepção do RERR.
- RERR_NumAffectedDest: campo número de destinos afetados. Contém a quantidade de destinos afetados pela quebra de um enlace ou aquecimento de um nó.
- RERR_AffectedDest_Add: campo endereço do destino afetado. Contém o endereço do destino que se tornou inacessível.
- RERR_AffectedDest_DSN: campo número de sequência do destino afetado. Contém o número de sequência conhecido na entrada da tabela de rotas para o destino que se tornou inacessível.

Segundo se pode observar no formato apresentado, o RERR é de tamanho variável e depende da quantidade de destinos afetados. Quando existe mais de um destino afetado, a informação dos campos RERR_AffectedDest_Add e RERR_AffectedDest_DSN, correspondente a cada destino afetado, é incorporada sequencialmente ao final da mensagem.

4.2.4 Mensagem HELLO

O formato da mensagem HELLO se apresenta na Tabela 4.4 e utiliza 4 campos. A funcionalidade de cada um é a seguinte:

Tabela 4.4: Formato da mensagem HELLO.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
HELLO_Type								HELLO_Reserved																							
																HELLO_Source_Add															
																HELLO_Dest_Add															

- HELLO_Type: campo tipo de mensagem. Contém o identificador correspondente à mensagem HELLO.
- HELLO_Reserved: bits reservados para uso futuro. São enviados com valor zero e ignorados na recepção do HELLO.
- HELLO_Source_Add: campo endereço do origem. Contém o endereço do próprio nó que gera a mensagem HELLO.
- HELLO_Dest_Add: campo endereço do destino. Como a mensagem HELLO é enviada para todos os vizinhos é copiado o endereço de *broadcast* (255.255.255.255). Se se deseja enviar para um nó específico, se indica o endereço do nó destino da mensagem HELLO.

4.2.5 Mensagem de Dados

O formato da mensagem de dado se apresenta na Tabela 4.5 e utiliza 3 campos. A funcionalidade de cada um é a seguinte:

Tabela 4.5: Formato da mensagem de dados.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	DATA_Type	DATA_Dest_Add
	DATA_Dest_Add	
	DATA_APP	

- DATA_Type: campo tipo de mensagem. Contém o identificador correspondente à mensagem DATA.
- DATA_Dest_Add: campo endereço do destino. Contém o endereço do nó destino para o qual são enviados os dados (nó coordenador).
- DATA_APP: campo dados da aplicação. Contém os dados recebidos da camada de aplicação que serão enviadas para o destino (nó coordenador).

4.3 Tabela de Rota do Protocolo LATOR

A tabela de rota armazena toda a informação necessária para o encaminhamento dos pacotes de dados e controle e para garantir o correto funcionamento do protocolo. Ela deve incluir as informações mais recentes disponíveis sobre os destinos. Portanto, é importante conhecer se é atualizada a informação recebida nas mensagens de controle, antes de realizar uma atualização na tabela de rota. Para isso, em LATOR se utiliza o mesmo conceito de número de sequência do protocolo AODV [37].

Cada nó da rede incrementa seu Número de Sequência (SN) em duas situações: (1) antes de originar uma descoberta de rota, logo depois esse valor é informado no campo RREQ_OSN da mensagem RREQ; (2) antes de um nó destino originar um RREP em resposta a um RREQ, logo depois esse valor é informado no campo RREQ_DSN da mensagem RREP. Então cada nó, comparando os números de sequência, tem conhecimento do nível de atualidade da informação recebida na mensagem de controle.

No protocolo LATOR a tabela de rota consiste em uma lista de entradas, onde cada entrada contém as seguintes informações:

- RT_Dest_Add: campo endereço do destino. Contém o endereço do destino para o qual a rota é fornecida.
- RT_DSN: campo Número de Sequência de Destino (DSN). Contém o último número de sequência conhecido do nó para o qual a rota é fornecida. Se não é conhecido o número de sequência é igualado a zero.
- RT_DSN_Valid: *flag* de número de sequência de destino válido. É marcado como válido quando o DSN é conhecido e se cria ou atualiza uma entrada válida na RT. É invalidado quando o destino se torna inacessível pela quebra de um enlace ou aquecimento de um nó. Também se indica como inválido quando não se conhece o DSN.
- RT_Route_State: *flag* de estado de entrada da tabela de rotas. É marcado como válido quando se cria ou atualiza uma entrada válida na RT. É invalidado quando o destino se torna inacessível pela quebra de um enlace ou aquecimento de um nó ou quando expira o tempo de vida da rota.
- RT_NextHop: campo próximo salto. Contém o endereço do próximo salto para encaminhar os pacotes para o destino indicado.
- RT_HopCount: campo contador de saltos. Contém a distância, em saltos, para alcançar o nó destino.
- RT_LifeTimeEntry: campo tempo de vida da entrada. Contém o tempo em milissegundos para o qual se considera válida a entrada. Esse tempo é determinado a partir do pacote de controle RREP ou é inicializado em um valor ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT predefinido. O tempo de vida da rota é atualizado sempre que a rota é utilizada para encaminhar pacotes de dados.
- RT_LQI_List: campo informação de qualidade dos enlaces. Quando a entrada é criada ou atualizada por um RREQ, contém o valor da informação de qualidade do enlace pelo qual o RREQ foi recebido. Quando a entrada é criada ou atualizada por um RREP, contém o valor da qualidade de cada enlace que forma parte da rota para alcançar o coordenador.
- RT_Precursores: campo nós precursores. Contém uma lista dos nós precursores que encaminham pacotes por uma rota associada à entrada. Em outras palavras,

o endereço dos nós para os quais uma resposta de rota (RREP) foi gerada ou encaminhada. Em caso de detecção da perda do enlace ou aquecimento do nó, uma mensagem RERR é enviada para os nós que estão na lista de precursores.

- `RT_EntryByRREP`: *flag* de entrada criada por um RREP. É ativado para indicar que a entrada foi criada ou atualizada por um RREP, caso contrário é desativada.
- `RT_EntryByRREQ`: *flag* de entrada criada por um RREQ. É ativado para indicar que a entrada foi criada ou atualizada por um RREQ, caso contrário é desativada.

As entradas durante o funcionamento do protocolo podem ser criadas ou atualizadas, segundo as mensagens recebidas e o seu processamento. Nas próximas seções são abordadas as atualizações da tabela de rota para cada caso.

De forma geral uma entrada para um destino é criada quando na RT não existe uma entrada para esse destino. Se já existe, independentemente do seu estado, então é atualizada. Para a atualização da entrada é tomado como referência o número de sequência do nó destino para o qual a entrada é atualizada.

Quando um nó recebe as mensagens de controle que têm informação do número de sequência (RREQ, RREP e RERR) relacionadas a um destino de alguma entrada da tabela de rota, a rota é atualizada nas seguintes situações:

- Quando o novo DSN recebido é maior que o DSN conhecido na tabela de rotas.
- Quando o novo DSN recebido é igual que o DSN conhecido na tabela de rotas; e o número de saltos para alcançar o destino indicado na mensagem recebida é menor que a quantidade de saltos existente na tabela de roteamento.
- Quando o DSN na tabela de rotas não é conhecido e o *flag* `RT_DSN_Valid` está marcado como inválido.

4.4 Geração e Processamento da Mensagem RREQ

A mensagem RREQ utilizada no protocolo LATOR é criada preenchendo os campos citados na Seção 4.2.1 e considera os seguintes aspectos:

- No campo tipo de mensagem (`RREQ_Type`) é copiado o ID correspondente à mensagem RREQ.

- O *flag* D é igualado a zero, para indicar que os nós intermediários que tenham uma rota ativa para o nó coordenador podem responder o RREQ recebido.
- Os bits reservados (RREQ_Reserved) têm seu valor atribuído a zero.
- O campo Contador de Saltos (RREQ_HopCount) é definido em zero.
- O identificador da mensagem RREQ (RREQ_ID) vai ser igual ao último RREQ_ID usado pelo nó sensor (RREQ_ID_LastUsed) incrementado em um.
- O campo Endereço do Destino (RREQ_Dest_Add) é o endereço do nó coordenador.
- O campo Número de Sequência de Destino (DSN) na mensagem RREQ (RREQ_DSN) é o último Número de Sequência de Destino conhecido, em nosso caso o número de sequência do nó coordenador. Esse valor de DSN conhecido é copiado do campo DSN na tabela de roteamento (RT_DSN).
- O campo Endereço do Originador (RREQ_Source_Add) é o endereço do nó sensor que gera a mensagem RREQ.
- O Número de Sequência do Originador (OSN) na mensagem RREQ (RREQ_OSN) é o próprio número de sequência do nó sensor que gera a mensagem RREQ, que é incrementado em um antes da inserção no RREQ.

Antes de transmitir o RREQ, o nó fonte armazena em um *buffer* o RREQ_ID. Dessa forma, se ele recebe o pacote novamente de seus vizinhos, ele pode identificar que o RREQ recebido foi gerado por ele, então não processa o pacote e é descartado.

O protocolo LATOR, de forma similar a como acontece no AODV, define um limite máximo de RREQs que podem ser enviados por segundo (RREQ_RateLimit) para evitar que a rede seja saturada de mensagens de controle. Em LATOR é definido um máximo de 10 mensagens RREQ enviados por segundo.

Também os nós sensores, depois de transmitirem um RREQ esperam pelas respostas *PATH_DiscoveryTime* milissegundos. Se nesse tempo não é recebida nenhuma resposta, o nó sensor pode tentar novamente descobrir uma rota transmitindo outro RREQ, até um máximo de *RREQ_RETRIES* vezes. Em cada nova tentativa, o nó sensor deve incrementar e atualizar o identificador de RREQ (RREQ_ID).

Os pacotes de dados, enquanto aguardam pela descoberta de rota, são armazenados em um buffer FIFO (*First In First Out*). Se após tentar a descoberta de rota

RREQ_RETRIES vezes não é recebido nenhum RREP enviado pelo nó coordenador, todos os pacotes de dados armazenados no *buffer* destinados para o coordenador são descartados do *buffer*.

Quando um nó recebe um RREQ, primeiro verifica o estado de sua temperatura. Se está superaquecido, o pacote RREQ recebido é descartado; caso contrário, o nó continua com seu processamento. Logo depois, os campos RREQ_Source_Add e o RREQ_ID são verificados para saber se o nó já tinha recebido anteriormente alguma mensagem RREQ com o mesmo identificador e o mesmo endereço de origem. Se foi anteriormente recebido, o pacote é descartado; caso contrário, o RREQ é processado.

No processamento, o nó primeiro incrementa o valor do contador de saltos no RREQ em um, para considerar o salto dado. Para garantir que as rotas tenham um número de saltos permitidos, o contador de saltos, após ser incrementado se compara com *HopsAllowed*; se o contador de saltos é menor que o número de saltos permitidos, se continua com o processamento da mensagem.

Em seguida, o nó procura na RT uma rota inversa para o nó sensor originador do RREQ recebido. Se não existe a rota inversa, ela é criada; se já existe, então a entrada dessa rota é atualizada. Essa rota inversa é necessária para poder encaminhar o RREP para o nó que originou o RREQ. Especificamente quando a rota inversa é criada ou atualizada, são executadas as seguintes ações:

- O campo Endereço do Destino (RT_Dest_Add) é o endereço do nó coordenador.
- O Número de Sequência de Destino na RT (RT_DSN) para o destino no caminho reverso é igual ao Número de Sequência do Originador do RREQ (RREQ_OSN). Quando se trata de uma atualização da entrada, o valor do RREQ_OSN é copiado se for maior que o valor já existente no campo RT_DSN da RT.
- O *flag* de número de sequência válido (RT_DSN_Valid) é ativado para indicar que é válido.
- O *flag* de estado da rota (RT_Route_State) é ativado para indicar que a rota é válida.
- O próximo salto na tabela de roteamento (RT_NextHop) é o nó do qual o RREQ foi recebido.
- A quantidade de saltos até o nó sensor fonte (RT_HopCount) é copiada do contador de saltos na mensagem RREQ.

- O tempo de vida ($RT_LifeTimeEntry$) da entrada da rota inversa é igual à soma do instante de tempo que se recebeu o RREQ (T_C) e o tempo de descoberta de rota (T_D).
- No campo RT_LQI_List é armazenado o valor da informação de qualidade do enlace, relativa ao enlace com o nó do qual o RREQ foi recebido. Esse valor de LQI do enlace de recepção do RREQ é armazenado temporariamente para depois ser enviado para o nó fonte na mensagem de resposta RREP.
- O *flag* $RT_EntryByRREQ$ é ativado para indicar que a entrada foi criada ou atualizada por um RREQ.
- O *flag* $RT_EntryByRREP$ é desativado.

Depois de criar ou atualizar o caminho reverso, o nó que recebe um RREQ pela primeira vez vai executar uma de duas opções possíveis: retransmitir a mensagem RREQ ou responder com um RREP.

Se o nó que recebe o RREQ não é o nó coordenador e não possui uma rota válida para alcançar o coordenador, retransmite o RREQ indicando o endereço de *broadcast*. Para isso, o nó quando processa o RREQ, compara seu próprio endereço com o endereço do nó destino indicado no RREQ; se não são iguais o nó busca na RT se tem uma rota ativa para o coordenador; caso não exista uma rota válida para o coordenador, o nó retransmite o RREQ indicando o endereço de *broadcast*. Nesse caso o outro campo do RREQ que é modificado é o contador de salto ($RREQ_HopCount$), que foi incrementado em um.

Se o nó que recebe o RREQ é o nó coordenador ou é um nó intermediário que tiver na sua tabela de rota uma entrada válida para o nó coordenador com o DSN maior ou igual ao DSN contido no pacote RREQ e, além disso, a soma do contador de saltos do RREQ incrementado e o número de saltos indicado na entrada da tabela de rotas é menor ou igual que o número de saltos permitidos, responde a solicitação gerando uma mensagem RREP conforme explicado na Seção 4.5.

4.5 Geração e Processamento da Mensagem RREP

Segundo foi supracitado, o RREP pode ser gerado pelo nó coordenador ou por um nó sensor intermediário que tenha na RT uma entrada válida para o nó coordenador com o DSN maior ou igual ao DSN contido no pacote RREQ e se o *flag* D (somente destino) não estiver ativado. Em ambos casos, a geração do RREP é um pouco diferente.

A informação correspondente ao endereço de destino (coordenador) e o endereço do nó origem são obtidos da mensagem RREQ. Nos dois casos, as informações em comum são preenchidas da seguinte forma:

- No campo tipo de mensagem (RREP_Type) é copiado o ID correspondente à mensagem RREP.
- Os bits reservados (RREP_Reserved) têm zero atribuído a seu valor.
- No campo endereço do destino do RREP (RREP_Dest_Add) é copiado o conteúdo do campo RREQ_Dest_Add.
- No campo endereço de origem do RREP (RREP_Source_Add) é copiado o conteúdo do campo RREQ_Source_Add.

Se a mensagem de resposta é gerada pelo nó coordenador, os campos restantes da mensagem devem ser preenchidos da seguinte forma:

- O campo Contador de Saltos do RREP (RREP_HopCount) é definido em zero.
- No campo Número de Sequência de Destino do RREP (RREP_DSN) é copiado o número de sequência do nó coordenador se o DSN do RREQ recebido (RREQ_DSN) é menor que o número de sequência do nó coordenador; caso seja igual, o nó coordenador incrementa em um seu próprio número de sequência antes de copiá-lo no RREP_DSN.
- No campo tempo de vida do RREP (RREP_LifeTime) é copiado o valor correspondente a duas vezes o tempo de vida das rotas.
- No campo RREP_LQI_List é copiado o valor da informação de qualidade do enlace correspondente ao próximo salto no caminho reverso, que foi por onde se recebeu o RREQ.

Se o RREP é gerado por um nó intermediário, primeiro o nó busca se na RT existe mais de uma rota válida para o coordenador; caso exista mais de uma, a rota é escolhida pela heurística de seleção de rotas utilizada. Apesar disso, quando o número de saltos indicado é dois de acordo com o padrão WBAN, o nó intermediário vai ter só uma única rota possível, correspondente à comunicação direta entre o nó intermediário e o nó coordenador. Uma vez que se tem definida a rota válida para alcançar o coordenador, os campos restantes do RREP devem ser preenchidos da seguinte forma:

- No campo Contador de Saltos do RREP (RREP_HopCount) é copiada a quantidade de saltos indicada na entrada válida disponível na tabela de rota.
- No campo Número de Sequência de Destino do RREP (RREP_DSN) é copiado o último DSN conhecido, também disponível na entrada da RT (RT_DSN).
- No campo tempo de vida do RREP (RREP_LifeTime) é copiado o valor calculado subtraindo a hora atual do tempo de expiração na entrada válida da RT selecionada (RT_LifeTimeEntry).
- No campo RREP_LQI_List é copiado o valor da lista de LQI indicada na entrada da RT no campo RT_LQI_List.

Uma vez criado o RREP, é transmitido para o próximo salto em direção ao originador do RREQ. Conforme o RREP percorre o caminho reverso, nós intermediários incrementam em um o contador de saltos; assim, quando o RREP alcança o nó fonte, o contador de saltos representa a distância em saltos, entre o nó sensor fonte e o nó coordenador. Nós intermediários também atualizam a lista de precursores da entrada na RT selecionada para alcançar o nó coordenador, colocando nessa lista o nó do qual se recebeu o RREQ que está sendo respondido.

Quando um nó recebe um RREP primeiro verifica o estado de sua temperatura. Se está quente o pacote RREP recebido é descartado; caso contrário o nó continua com seu processamento. Então, incrementa em um o valor do contador de saltos recebido no RREP (RREP_HopCount) para considerar o último salto dado e em seguida, cria uma nova entrada na tabela de rota para o coordenador, se ainda não existe uma.

Se na RT já existe uma entrada cujo endereço do próximo salto (RT_NextHop) é diferente ao endereço do nó desde o qual se recebeu o RREP, também é criada uma nova entrada para o nó coordenador; caso os endereços sejam iguais a entrada é atualizada.

Na atualização da entrada se toma como referência o valor do Número da Sequência de Destino (DSN). Para isso compara-se o valor do DSN recebido no RREP (RREP_DSN) com o valor do DSN da entrada na tabela de rota (RT_DSN), então a entrada é atualizada nas seguintes circunstâncias:

- Se o RT_DSN_Valid é marcado como inválido.
- Se o RT_DSN_Valid é marcado como válido e o valor de RT_DSN menor que o valor de RREP_DSN.

- Se o RT_DSN é igual ao RREP_DSN, mas a rota é marcada como inativa.
- Se o RT_DSN é igual ao RREP_DSN e o contador de saltos da mensagem RREP (RREP_HopCount) é menor que o número de saltos indicados na tabela de rota (RT_HopCount).

Sempre que uma entrada de rota para o nó coordenador for criada ou atualizada na tabela de rota, devem-se realizar as seguintes ações:

- No campo endereço do destino da entrada (RT_Dest_Add) é copiado o conteúdo do campo (RREP_Dest_Add).
- No campo RT_DSN da entrada de rota é copiado o valor do RREP_DSN.
- O Número de Sequência de Destino (DSN) é marcado como válido, ativando o *flag* RT_DSN_Valid.
- O *flag* RT_Route_State é ativado para indicar que a entrada da rota está ativa.
- No campo do próximo salto da entrada da rota (RT_NextHop) é copiado o endereço do nó desde o qual o RREP foi recebido.
- No contador de saltos da entrada da rota (RT_HopCount) é copiado o valor do contador de saltos recebido no RREP (RREP_HopCount) incrementado em um.
- O tempo de vida de entrada (RT_LifeTimeEntry) é definido para a soma do tempo atual mais o valor do tempo de vida na mensagem RREP (RREP_LifeTime).
- No campo RT_LQI_List é armazenada a informação de qualidade de enlace recebida no RREP, no campo RREP_LQI_List.
- Na lista de precursores para essa entrada na RT (RT_Precursors) se adiciona o endereço do nó do próximo salto do RREP, ou seja o nó para o qual o RREP é reenviado. Quando o nó que processa o RREP é o originador da solicitação de rota, não se inclui nenhum endereço na lista de precursores.
- O *flag* EntryByRREP é ativado para indicar que a entrada foi criada ou atualizada por um RREP.
- O *flag* EntryByRREQ é desativado.

Uma vez que uma entrada de rota é criada ou atualizada na RT dos nós intermediários, ela fica disponível para que os nós intermediários realizem o envio dos seus dados para o coordenador sem ter que realizar o processo de descoberta de rota.

Logo depois de criar ou atualizar a entrada na tabela de rota, o nó que recebe o RREP compara o seu endereço com o endereço do nó origem indicado pelo RREP no campo RREP_Source_Add, se não são iguais, ele não é o destino do RREP recebido. Então, o RREP é enviado para o próximo salto do caminho reverso. Para isso, o nó consulta a sua tabela de rotas para determinar o próximo salto da entrada para o nó origem. Essa entrada para o nó origem foi criada quando se formou a rota inversa durante a disseminação do RREQ.

Antes de enviar o RREP para o próximo salto é atualizada a lista de LQI, campo RREP_LQI_List. Para atualizá-lo, o valor armazenado no campo RT_LQI_List da entrada correspondente ao caminho reverso é adicionado à lista de LQI do RREP, no campo RREP_LQI_List.

Quando o RREP é recebido pelo nó originador da solicitação de rota, o nó consulta se o tempo de descoberta de rota ($T_{PathDiscovery}$) expirou. Se expirou, ele cancela todos os processos associados à disseminação do RREQ e logo depois é realizada a escolha de rota com base no LQI e os dados são encaminhados para o coordenador. Caso não tenha expirado, o nó aguarda pela chegada de outros RREP até que expire o tempo $T_{PathDiscovery}$.

4.6 Geração e Processamento da Mensagem HELLO

A mensagem HELLO é gerada seguindo o formato apresentado na Seção 4.2.4 e se começa enviar no instante que o nó recebe um RREP e começa formar parte de uma rota ativa para o coordenador. A geração da mensagem HELLO considera os seguintes aspectos:

- No campo tipo de mensagem (HELLO_Type) é copiado o ID correspondente à mensagem HELLO.
- Os bits reservados (HELLO_Reserved) têm seu valor atribuído a zero.
- No campo endereço da origem (HELLO_Source_Add) é copiado o endereço do próprio nó que gera a mensagem HELLO.
- No campo endereço destino (HELLO_Dest_Add) é copiado o endereço de *broadcast* (255.255.255.255).

A mensagem HELLO é enviada periodicamente a cada HELLO_INTERVAL milissegundos. Para isso, logo depois de enviar o primeiro HELLO, é ativado um temporizador com o tempo HELLO_INTERVAL; cada vez que ele expira a mensagem HELLO é enviada novamente e reativado o temporizador.

De forma similar ao protocolo AODV se define parametricamente a quantidade de perda de pacotes HELLO permitidos (HELLO_LOSS_ALLOWED). Esse parâmetro por padrão é definido em dois, mas pode ser mudado. Então, o tempo de vida associado à contagem e processamento dos HELLOs recebidos (HELLO_TimeLife) de um nó vizinho é HELLO_LOSS_ALLOWED vezes HELLO_INTERVAL milissegundos. Se não foi recebido um HELLO antes de expirar esse tempo, se considera que o enlace com o vizinho correspondente está quebrado.

Quando um nó recebe uma mensagem HELLO, ele incrementa um contador e atualiza a informação associada ao vizinho do qual foi recebido; também é ativado um temporizador com o tempo HELLO_TimeLife. Assim, quando expira o HELLO_TimeLife se não foi recebido outro HELLO do vizinho associado ao temporizador expirado, o nó considera que o enlace está quebrado. Então ele desativa, na sua tabela de rota, todas as entradas que têm como próximo salto o nó do enlace quebrado. Logo depois envia uma mensagem de RERR para o precursor de cada entrada afetada indicando os destinos que foram afetados pela quebra do enlace.

4.7 Geração e Processamento da Mensagem RERR

Um nó da rede vai gerar e enviar uma mensagem de erro de rota (RERR) nas seguintes situações:

- Quando o nó detecta a perda do enlace para o próximo salto de uma rota ativa que está sendo utilizada para o envio de dados para o nó coordenador. Evento que acontece se não foi recebido um HELLO antes de expirar duas vezes o tempo HELLO_TimeLife.
- Quando o nó detecta um aumento da sua própria temperatura a um valor maior ou igual que o limite permitido (TempRiseAllowed).
- Quando o nó recebe um RERR e tem que notificar aos outros nós que estão na lista de precursores das entradas para os destinos afetados, tanto pela perda do enlace quanto pelo aquecimento do nó.

Quando a RERR é gerada pela perda de um enlace, o nó primeiro procura na sua tabela de rota todas as entradas que têm como próximo salto o nó do enlace perdido; essas entradas são marcadas como inválidas. Logo depois cria uma lista de todos os destinos afetados pela perda do enlace. Também é feita uma lista com os nós precursores de cada entrada da RT afetada. Então o nó envia iterativamente em *unicast* um RERR para todos os nós precursores da lista criada.

Quando a RERR é gerada pelo aquecimento do próprio nó, também é criada uma lista de precursores e destinos afetados, só que neste caso se consideram todas as entradas válidas existentes na tabela de rota; já que o nó aquecido fica indisponível para uso e tem que notificar a todos seus precursores dos destinos afetados. Neste caso o nó aquecido desabilita as entradas válidas na sua RT e logo depois envia a notificação aos precursores para evitar ser usado nos próximos envios de dados.

Quando a RERR é gerada pelo recebimento de outro RERR, o nó que recebeu o RERR gera as listas de precursores e destinos inacessíveis considerando só as entradas da RT que têm como próximo salto o nó transmissor do RERR recebido. Neste caso, essas entradas são marcadas como inválidas. Quando o nó que recebe um RERR não tem nenhum precursor para notificar do erro de rota, ele só desabilita as entradas correspondentes. Nesses três casos, basicamente a diferença está na hora de realizar as listas de precursores e destinos afetados. Então, os campos da mensagem RERR são preenchidos da seguinte forma:

- No campo tipo de mensagem (RERR_Type) é copiado o ID correspondente à mensagem RERR.
- Os bits reservados (RERR_Reserved) têm seu valor atribuído a zero.
- No campo RERR_CountDest é copiada a quantidade de destinos afetados que são enviados na mensagem RERR. Esse valor é obtido a partir da lista de destinos afetados previamente criadas.
- No campo RERR_DestAfect_Add se copia o endereço do destino afetado.
- No campo RERR_DestAfect_DSN é copiado o DSN, conhecido na RT, correspondente ao destino indicado no RERR_DestAfect_Add.

Como se pode ver no formato da mensagem RERR apresentado na Seção 4.2.3 os destinos afetados da lista antes referida são incluídos sequencialmente ao final da mensagem.

Se a lista de precursores tem vários nós incluídos, a mensagem RERR é transmitida em *unicast* para cada nó precursor. Então, é conveniente limitar a taxa de envio de RERR, assim se evita que o envio contínuo dos RERR gerado por um único nó interfira na transmissão de outros pacotes. Para isso se define a taxa de envio de RERR em RERR_RateLimit mensagens por segundo.

4.8 Geração e Processamento da Mensagem DATA

Quando o nó sensor deseja enviar alguma informação para o nó coordenador, na camada de roteamento se recebem os dados da camada de aplicação. Então, na camada de roteamento o nó primeiramente cria uma mensagem de dado (DATA) preenchendo os campos da mensagem da forma seguinte:

- DATA_Type: é copiado o identificador correspondente à mensagem DATA.
- DATA_Dest_Add: é copiado o endereço do nó destino para o qual são enviados os dados, nesse caso o nó coordenador.
- DATA_APP: é copiado o pacote de dados DATA_APP recebido da camada aplicação. Sendo este encapsulado na mensagem DATA do protocolo LATOR.

Depois busca na sua tabela de rotas se existe uma entrada válida para o nó coordenador. Se o nó tem disponível uma rota, o nó encaminha o pacote DATA para o próximo salto indicado na RT e é passado para a camada MAC para que esta gerencie a transmissão do pacote de dado. Se não tem uma rota ativa para o nó coordenador, a mensagem DATA é armazenada temporariamente em um buffer para mensagens de dados, enquanto o processo de descoberta de rota tenta encontrar uma rota. Se a rota é encontrada, é processado o buffer de dados e a mensagem DATA é encaminhada segundo foi supracitado. Se depois de RREQ_RETRIES tentativas de encontrar uma rota sem sucesso, a mensagem DATA é apagada do buffer. Caso o nó esteja superaquecido, a mensagem se armazena no buffer. Só é enviada ou se ativa a busca de rotas, quando a temperatura do nó alcança um valor abaixo do limiar 1 definido.

Quando um nó recebe uma mensagem DATA da camada MAC, primeiro ele olha seu estado da temperatura. Se está superaquecido, a mensagem DATA é descartada. Caso contrário continua com o processamento do pacote DATA. Então, ele compara seu próprio endereço com o destino indicado na mensagem DATA para saber se ele é o destino da

mensagem de dados. Se ele é o destino a mensagem, DATA_APP é desencapsulada e enviada para a camada de aplicação. Se ele não é o destino, então re-encaminha o pacote DATA para o próximo salto indicado na entrada da RT. Caso a entrada correspondente ao destino, na RT, tenha expirado o tempo de vida, então o nó insere o pacote recebido no seu buffer de dados e ativa o processo de descoberta de rota segundo foi supracitado.

Capítulo 5

Implementação e Avaliação

No presente capítulo se apresenta a implementação e avaliação do protocolo LATOR. Inicialmente é apresentado o *framework* Castalia, utilizado para a implementação e avaliação da proposta. Logo depois se explica como foi implementado o protocolo e as relações com os módulos do Castalia. Também é apresentado o cenário utilizado para a avaliação da proposta e os experimentos realizados para avaliar o desempenho do protocolo proposto. Por último, são apresentados os resultados obtidos e a análise dos mesmos.

5.1 Framework Castalia

Para o desenvolvimento e avaliação da proposta apresentada neste trabalho, utilizou-se o *framework* Castalia. Este é um simulador desenvolvido pelo Centro Nacional de Pesquisa de Tecnologias da Informação e Comunicações da Austrália (NICTA), para Redes de Sensores Sem Fio (WSN), Redes Pessoais (PAN) e, em geral, redes de dispositivos de baixa potência. Este *framework* opera sobre o simulador OMNET++. O Castalia pode ser usado por pesquisadores e desenvolvedores que desejam testar os seus algoritmos e/ou protocolos em canais sem fio e modelos de rádio realistas. Também pode ser usado para avaliar diferentes características de plataforma para aplicações específicas, já que é altamente configurável e pode simular uma ampla gama de plataformas [6].

Especificamente para simular WBAN, o Castalia oferece um modelo de canal avançado baseado em dados obtidos empiricamente. Esse modelo define um mapa de perdas de trajetões, em vez de simples conexões entre os nós. Consta de um modelo para variação temporária de perda de trajetória e também suporta mobilidade dos nós [6]. O modelo de rádio disponível no Castalia é baseado em sistemas reais para comunicações de baixa potência. Esse modelo estima a probabilidade de recepção baseada em SINR (*Signal-to-*

Interference-plus-Noise Ratio), tamanho de pacote e tipo de modulação. Permite vários níveis de potência de Tx, podendo identificar variações para nós individuais. Realiza uma modelagem realista do Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI) e detecção de portadora. Define estados com diferentes consumos de energia e atrasos na comutação entre estados [6].

O Castalia também oferece outras características de interesse, por exemplo, o modelo da camada física é altamente flexível, detecta: ruído do dispositivo do sensor, faixa de erro e consumo de energia. Considera o desvio do relógio do nó. Tem disponíveis protocolos MAC e de roteamento [6].

O Castalia foi projetado para que os usuários possam implementar os seus algoritmos e protocolos usando as bibliotecas e módulos fornecidos pelo simulador. Não é uma plataforma específica para qualquer tipo de sensor. Seu objetivo é fornecer uma arquitetura genérica, confiável e realista para a avaliação de algoritmos antes de proceder à implementação em *testbeds* reais. Um aspecto importante do Castalia é que em cada um dos módulos supracitados, consideram-se as características de WBAN, já que tem implementado as especificações do padrão WBAN.

5.1.1 Estrutura básica

Castalia tem uma estrutura hierárquica baseada em módulos. Existem três módulos interligados: o nó, o canal sem fio e o processo físico. Segundo se pode observar na Figura 5.1, os nós não se conectam diretamente entre eles, senão através do módulo de canal sem fio. Na figura, as setas significam uma mensagem passando de um módulo para outro. Quando um nó tem um pacote para enviar, ele vai para o canal sem fio, que decide quais nós devem receber o pacote. No outro extremo, eles estão ligados ao processo físico, do qual obtêm informações sobre alguma magnitude física coletada pelo sensor. Os nós mostram o processo físico no espaço e no tempo para obter as leituras do sensor. Um nó pode ter vários dispositivos de detecção, e portanto pode haver vários processos físicos associados a esse nó [6].

Por sua vez, cada nó é um módulo composto, cuja estrutura é mostrada na Figura 5.2. As setas sólidas significam a troca de mensagens entre os diferentes submódulos e as setas tracejadas significam chamadas de função simples. Por exemplo, a maioria dos módulos chama uma função do gerenciador de recursos para indicar que a energia foi consumida [6]. Os módulos de aplicação, MAC e roteamento são aqueles nos quais usualmente os usuários trabalham, geralmente na implementação de novos algoritmos.

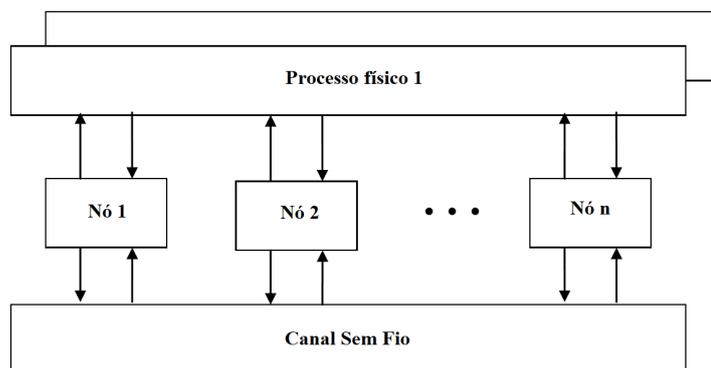


Figura 5.1: Módulos do Castalia e as suas conexões [6].

Castalia fornece, em forma de classes abstratas, a infraestrutura necessária para criar novos protocolos, mas certas regras devem ser seguidas para sua integração com o programa de simulação. Os novos módulos devem ser acoplados à hierarquia existente e implementar as interfaces necessárias. Da mesma forma, as classes que fornecem funcionalidade para os novos módulos devem herdar de classes virtuais básicas que implementam os comportamentos básicos esperados de qualquer módulo de seu tipo. Por exemplo, a classe base de roteamento *VirtualRouting* fornece funções para encapsulamento/descapsulamento de pacotes, mapeamento de endereços de rede para endereços MAC e tratamento de duplicatas. Desta forma, a inovação contínua do simulador é garantida através de código proposto por fontes terceiras, e uma adaptação mais simples do código antes das novas versões do simulador. Para definir o comportamento dos novos módulos se utiliza código C++.

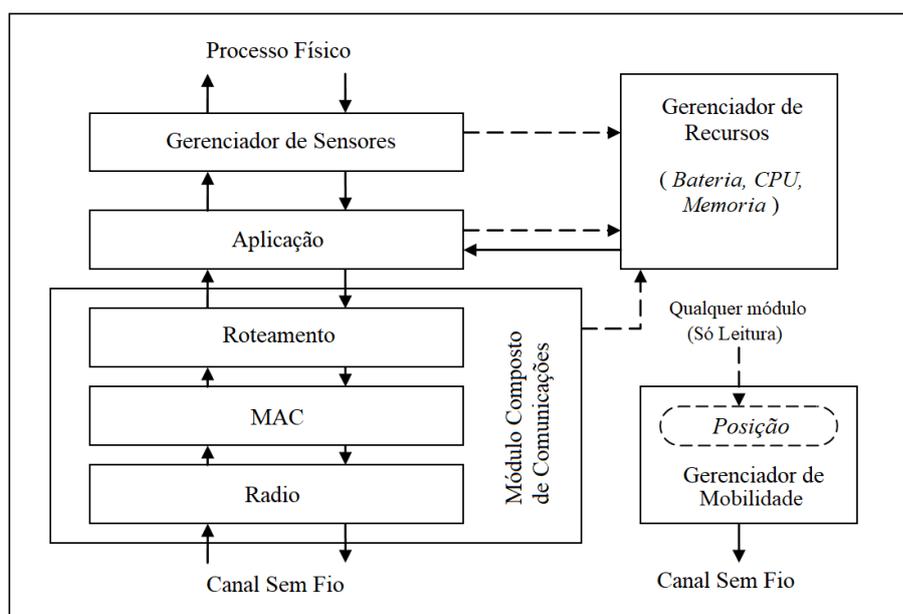


Figura 5.2: Módulo composto para os nós em Castalia [6].

Por padrão, o simulador não inclui módulos de protocolo de roteamento usados em redes de sensores, mas pesquisadores têm desenvolvido e disponibilizado alguns. A razão para isso é que o Castalia foi projetado inicialmente para fornecer um ambiente de simulação tão real quanto possível. Portanto, sua principal força está focada nas camadas MAC e física. Na proposta apresentada neste trabalho se criou um novo módulo de roteamento. Os detalhes dessas implementações serão apresentados nas próximas seções deste capítulo.

5.1.2 Simulação e coleta de resultados

Castalia permite selecionar em um arquivo de configuração da simulação as configurações especificadas para o cenário desejado. Esse arquivo de configuração geralmente é chamado *omnetpp.ini* e contém os parâmetros definidos para cada módulo. Esses parâmetros dos módulos podem ser dinamicamente variados, por exemplo, a potência de transmissão dos transeptores, ou a taxa de dados em cada repetição da simulação. O *script* chama o executável (*CastaliaBin.exe*) com os parâmetros necessários e o programa de simulação é executado. Como resultado, dois novos arquivos são obtidos: (1) *Castalia-Trace.txt*: contém as descrições dos eventos que ocorreram em cada módulo. (2) *YYMMDD-HHMMSS.txt*: é o arquivo de saída padrão do Castalia e contém os resultados coletados por cada módulo. O nome corresponde à data e hora atuais do sistema no qual ele foi criado.

Castalia não fornece uma interface gráfica, então todas as operações devem ser feitas a partir da linha de comando do Linux. O arquivo de saída pode ser lido diretamente em um processador de texto, mas é melhor processá-lo através do *script CastaliaResults*. O *script* aceita uma série de parâmetros que são usados para entregar os resultados solicitados ao *shell*, que podem ser latência, taxa de entrega de pacote, energia residual da bateria, quadros recebidos sem interferência, entre outros.

5.2 Implementação de LATOR

Para a avaliação do desempenho, o protocolo proposto nesta dissertação foi implementado no *framework* Castalia. Para isso, foi criado um submódulo do módulo de roteamento do Castalia, nomeado *LatorRouting*. Esse submódulo conta com um conceito Tabela de Rotas e outro Pacotes LATOR. Na Figura 5.3 se apresenta um diagrama conceitual da implementação do protocolo LATOR no Castalia. Nessa representação são utilizados artefatos UML para indicar a relação entre os conceitos supracitados e suas relações com o *framework* Castalia.

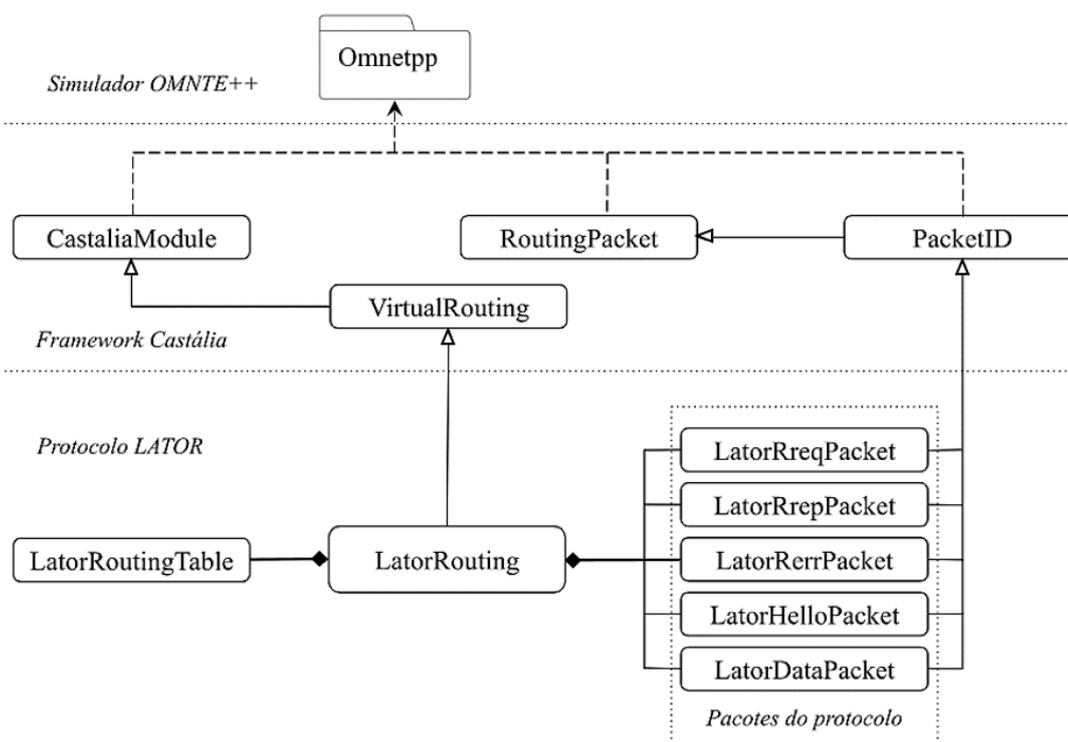


Figura 5.3: Diagrama conceitual da implementação de LATOR em Castalia

O princípio de funcionamento do LATOR foi implementado numa classe nomeada *LatorRouting*, sendo a classe principal do submódulo de roteamento LATOR. Ela controla os processos: descoberta de rota, prevenção do aquecimento, encaminhamento de dados e atualização da RT; realizando a sequência lógica descrita no Capítulo 4. Esta classe, além de vários métodos auxiliares, conta com métodos principais encarregados de: atualização da tabela de rotas, geração e processamento de cada tipo de pacote, controle dos temporizadores utilizados para garantir o funcionamento do protocolo e o cálculo do aumento de temperatura do nó.

Para a tabela de rotas foi implementada uma classe derivada nomeada *LatorRoutingTable* cujo atributo principal é a mesma RT, composta por uma lista de entrada; e contém todos os métodos necessários para a atualização das entradas na RT e obtenção de informação dela. Entre a classe *LatorRouting* e *LatorRoutingTable* existe uma relação de composição. Dessa forma, *LatorRouting* se auxilia da classe *LatorRoutingTable* para a manipulação da tabela de rotas.

Para a implementação dos pacotes LATOR foi criada uma classe para cada tipo de pacote LATOR, dotada de todos os métodos necessários para criar, modificar e acessar a suas respectivas informações. Essas classes também têm uma relação de composição com a classe principal *LatorRouting*, permitindo a manipulação dos pacotes. Essas classes são

geradas automaticamente pelo Castalia a partir de um arquivo *.msg*.

Esse arquivo é escrito em linguagem NED e é interpretado pela ferramenta *nedtool* do OMNET++. Nele somente são definidos os pacotes desejados e indicados os campos que compõem cada pacote e, a partir dessa informação, o Castalia cria em código C++ as classes relativas aos pacotes LATOR, contendo os métodos necessários para inserir e acessar a informação de cada campo dos pacotes.

As classes que definem os pacotes têm uma relação de herança com as classes *RoutingPacket* e *PacketID* disponíveis no Castalia. Essas duas classes permitem acessar aos métodos para a definição dos pacotes LATOR, além do empacotamento e desempacotamento deles na interação com a camada MAC. Essas classes, por sua vez, têm uma relação de dependência com o simulador OMNET++.

Por outro lado, a classe *LatorRouting* tem relação de herança com a classe *VirtualRouting*, a qual está disponível no Castalia e pertence ao módulo de roteamento. Em *VirtualRouting*, são definidas todas as funcionalidades da camada de roteamento comuns para todo tipo de protocolo de camada NET. Ela permite a interação com outras camadas do módulo composto definido para os nós em Castalia; especificamente a troca de informação entre a camada de rede com a camada MAC e a camada de aplicações. A classe *VirtualRouting* também tem relação de herança com a classe *CastaliaModule* que garante integração do protocolo LATOR no módulo composto apresentado na Figura 5.2. A classe *CastaliaModule* também tem dependência com simulador OMNET++.

5.3 Cenário WBAN utilizado

A rede WBAN utilizada para a análise e avaliação da proposta apresentada neste trabalho é formada por 6 nós distribuídos no corpo humano, segundo apresentado na Figura 5.4. O nó 0 alocado no lado direito da cintura atua como coordenador/coletor e os nós restantes (nós 1-5) alocados nos pulsos, pés e peito atuam só como nós sensores. Nessa rede, os nós sensores medem sinais biológicos (temperatura, glucoses, oxigênio em sangue, eletrocardiograma, entre outros) e transmitem os dados detectados para o nó coletor, através de comunicação sem fio. A transmissão pode ser tanto de forma direta quanto multi-saltos.

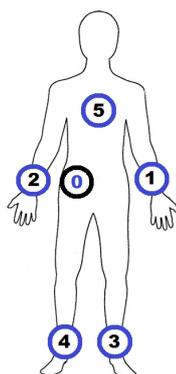


Figura 5.4: Posição dos nós no corpo

5.3.1 Canal sem fio

De forma geral, o canal sem fio é um meio difícil de modelar, especialmente quando se consideram ambientes dinâmicos como o definido em WBAN. Por um lado, a mobilidade do corpo e por outro a perda de propagação, relativas às características dielétricas de cada tecido do corpo humano, são aspectos que contribuem à variabilidade do canal e precisam ser definidos. Para fornecer uma estimativa do comportamento do canal sem fio em correspondência com um cenário real, se utiliza um mapa de perda e um modelo de variação temporal com base em uma função de densidade de probabilidade. Ambos disponíveis no Castalia e produzidos a partir de medidas experimentais e considerando a mobilidade do corpo.

Esses modelos são resultados do trabalho apresentado em [43]. Nesse trabalho foram realizados experimentos utilizando antenas transmissoras (Tx) e receptoras (Rx) coladas ao corpo de oito pessoas adultas. As antenas foram alocadas nas posições indicadas na Figura 5.4, simulando os transceptores dos nós da WBAN. Utilizaram-se antenas flexíveis, vestíveis e aproximadamente omnidirecionais. Todas as medições foram feitas em um ambiente de escritório e são baseadas no movimento das pessoas em uma esteira em quatro velocidades diferentes: 3, 6, 9 e 12 km/h; considerando assim desde o movimento do corpo de uma pessoa caminhando devagar, até o movimento de uma pessoa correndo. Se realizaram conjuntos de medições de 60 segundos de duração, registrando a amplitude do sinal recebido a cada 1 milissegundo (ou seja, 60.000 amostras). No experimento, em geral foram capturados aproximadamente 3,5 horas de dados.

5.3.2 Camada Física

Na camada física se utilizou a variante *Narrow Band* (NB-PHY) disponível em Castalia. Os parâmetros de rádio definidos para o cenário deste trabalho atendem à proposta de rádio do padrão WBAN. Entre os parâmetros de rádio definidos para cada nó da rede estão: taxa de dados, tipos de modulação, bits por símbolo, frequência, largura de banda, largura de banda de ruído, ruído de fundo, potência de transmissão, sensibilidade do receptor e nível de potência limiar para a verificação de uso do canal. Na Tabela 5.1 se mostram os valores definidos para esses parâmetros.

Tabela 5.1: Parâmetros de rádio definidos

Parâmetros	Valores definidos
Taxa de dados (<i>dataRate</i>)	1024 kbps
Modulação (<i>modulationType</i>)	DQPSK
Bits por símbolo (<i>bitsPerSymbol</i>)	2
Frequência de portadora (<i>carrierFreq</i>)	2,4 GHz
Largura de banda (<i>bandwidth</i>)	20 MHz
Largura de banda de ruído (<i>noiseBandwidth</i>)	1 MHz
Ruído (<i>noiseFloor</i>)	-104 dBm
Potência de Tx (<i>TxOutputPower</i>)	-10 dBm (nó coordenador) -20 dBm (nós sensores)
Sensibilidade do Rx (<i>sensitivity</i>)	-87 dBm
Limiar de CCA (<i>CCAThreshold</i>)	-95 dBm

A potência de saída do rádio para os nós sensores foi mantida em -20 dBm e para o nó coordenador em -10 dBm. Uma potência de transmissão mais alta para o nó coordenador permite que todos os nós sensores recebam beacons da camada MAC. Uma vez que se considera que um coordenador é um dispositivo não implantado, tem menos restrição de energia. A máxima taxa de transmissão do rádio foi definida em 1024 kbps.

5.3.3 Camada MAC

Nesse cenário o nó coordenador utiliza o modo *beacon* com limites de superquadro e no intervalo MAP utiliza CSMA/CA como técnica de acesso ao canal. Este modo está implementado no módulo *BaselineBANMac* do Castalia. Na Tabela 5.2 se apresentam os valores definidos de alguns dos parâmetros MAC.

Tabela 5.2: Parâmetros MAC definidos

Parâmetros	Valores definidos
Duração do slot de Alocação (<i>allocationSlotLength</i>)	10 ms
Duração do superquadro (<i>beaconPeriodLength</i>)	32 slots
Tamanho do buffer (<i>macBufferSize</i>)	48 pacotes
Tentativas de envio de pacotes (<i>maxPacketTries</i>)	2

5.3.4 Aspectos do encaminhamento

Em uma WBAN com topologia em estrela e comunicação de um salto, os dados são enviados diretamente para o nó coordenador. Nesse cenário pode acontecer que, quando é enviado um pacote para o nó coordenador, o enlace direto não esteja disponível por causa da postura do corpo, provocando a perda do pacote transmitido. Por outro lado, é possível que outro caminho esteja disponível nesse instante. Para fins de comparação, na avaliação deste trabalho se utiliza um mecanismo reativo para encontrar a primeira rota disponível no momento de transmissão. Este basicamente envia por *broadcast* uma solicitação de rota para o nó coordenador, o qual a responde em *unicast* pelo caminho em que recebeu a solicitação. Esse mecanismo não considera métricas de qualidade dos enlaces sem fio e o nó coordenador só responde a primeira solicitação recebida.

De igual forma, para fins de comparação, na avaliação é utilizado o protocolo LAOR (*Link-Quality Aware On-Demand Routing*). Este também é um mecanismo reativo e realiza a descoberta e escolha de rotas considerando a informação de qualidade dos enlaces de forma similar ao protocolo LATOR. A variante LAOR não considera o controle do aquecimento dos nós. Unicamente foi projetado para enfrentar as quebras dos enlaces causadas pelo movimento do corpo e melhorar o PDR considerando o LQI na seleção das rotas.

Tanto para LAOR quanto para o protocolo LATOR, o tempo de descoberta de rota (T_D) foi definido de forma empírica em 800 milissegundos. O número máximo de saltos permitidos é definido em dois saltos. Dessa forma, buscam-se todos os caminhos de dois saltos disponíveis para alcançar o nó coordenador, seguindo as especificações do padrão WBAN. Foram consideradas até duas tentativas de descoberta de rota ($Attempt_D$) consecutivas e duas perdas de mensagens HELLO (HELLO_LOSS_ALLOWED).

O RSSI é uma medida da potência presente em um sinal de rádio recebido. Então, a seleção de caminhos com os melhores valores de RSSI permite selecionar rotas com maior probabilidade de que o nó receptor receba os pacotes de dados. Também, no trabalho

apresentado em [49] resultados experimentais mostram que existe uma relação direta entre o RSSI e a mobilidade do corpo humano. Por isso, o RSSI foi considerado como indicador de qualidade do enlace, mas outros indicadores de qualidade podem ser usados. Também a coleta de informação que se realiza durante a descoberta de rota pode ser utilizada com outras métricas de interesse como pode ser a energia ou a temperatura dos nós.

Para modelar o comportamento da temperatura, foi utilizada a forma discretizada da equação de Pennes apresentada na Equação 2.7 da Seção 2.5. Foi considerada a atividade dos nós tomando como referência um intervalo de tempo discretizado de um milissegundo. Como passo espacial se definiu o valor de 0,005 metros. Para simular o modelo de temperatura, foram tomadas como referência características radioelétricas dos transmissores e características elétricas e térmicas do tecido do corpo humano consideradas em [46], para as quais resulta um SAR de 0,8402 W/kg . Os valores dos outros parâmetros são: densidade do tecido, 1040 kg/m^3 ; calor específico do tecido, 3600 $J/kg^\circ C$; condutividade térmica do tecido, 0,498 $J/ms^\circ C$; permissividade relativa do tecido, 52,73; condutividade, 1,7388 S/m ; constante de perfusão do sangue, 2700 $J/m^3 s^\circ C$; temperatura do sangue, 37 $^\circ C$; e corrente da antena, 0,1 A.

5.4 Avaliação do protocolo LATOR

Nesta seção, são analisadas as variantes de seleção de rotas mencionadas na Seção 4.1.4 e é apresentada a avaliação de desempenho do protocolo LATOR. Para isso, o cenário descrito na Seção 5.3 foi simulado usando o *framework* Castalia. As simulações foram realizadas vinte vezes para todos os nós e os resultados mostrados são para o intervalo de confiança de 95%. As simulações estão direcionadas em avaliar: a seleção de caminho com base no LQI e o controle do aquecimento. As métricas observadas foram temperatura, taxa de entrega de pacotes e latência da comunicação.

5.4.1 Análise da seleção de rotas

Uma vez implementadas as diferentes variantes mencionadas na Seção 4.1.4 para a escolha de rota com base no LQI, foi simulada cada uma para analisar qual oferece melhor desempenho no cenário WBAN descrito. O tempo de simulação foi de mil segundos. As simulações para este teste foram feitas com uma taxa de transmissão de um pacote por segundo e uma carga de dados constante de 120 bytes. Neste cenário, as taxas suportam aplicações de até 1 kbps, válidas para sensores médicos de baixa taxa de transmissão,

como o caso de medida da temperatura corporal e glicose. Estas simulações foram feitas sem que os nós chegassem ao estado de superaquecimento, pois o foco está em analisar o processo de seleção de rotas.

Na Figura 5.5, são apresentados os resultados da taxa de entrega de pacotes para cada nó sensor quando se utiliza a rota direta, a primeira rota disponível e o protocolo LATOR com seus três critérios de seleção de rotas. Os valores, em cada caso, representam o percentual de pacotes transmitidos pelos nós sensores que chegaram ao nó coordenador.

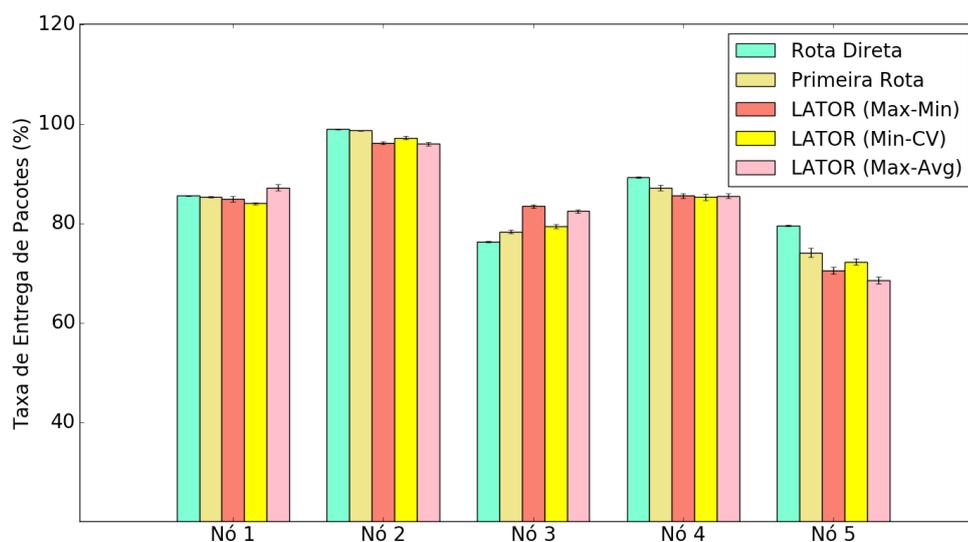


Figura 5.5: PDR para cada nó transmissor.

Segundo se pode observar na figura, os resultados para o cenário descrito mostraram que quando a rota é selecionada considerando o maior RSSI mínimo (Max-Min), se logram os melhores resultados na taxa de entrega de pacotes, pois resultam mais beneficiados os nós que têm a menor qualidade de enlace na comunicação direta, como é o caso do nó 3. Para continuar com uma análise mais detalhada se toma como referência o nó 3 como transmissor.

No cenário descrito são possíveis 5 rotas diferentes para encaminhar os dados do nó 3 para o nó coordenador, todas representadas na Figura 5.6, onde além do caminho direto, há outras 4 rotas com um nó intermediário. Nas simulações são utilizadas todas elas, mas dependendo do protocolos de encaminhamento algumas são mais utilizadas.

Na simulação utilizando a primeira rota encontrada, o nó 3 processou 19964 pacotes recebidos da camada de aplicação, mas deles só 19868 foram enviados para a camada MAC. Foram descartados no buffer 79 pacotes porque a rota não foi encontrada. No entanto, com o protocolo LATOR, para os três critérios de seleção de rotas, dos 19963 pacotes recebidos da camada de aplicação, 19954 foram enviados para a camada MAC.

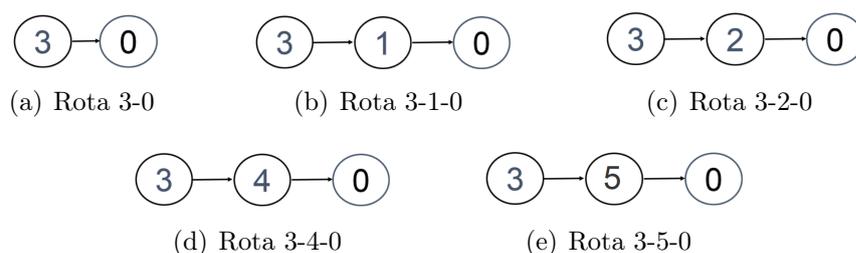


Figura 5.6: Rotas utilizadas pelos protocolos de roteamento

Neste caso, só 9 pacotes foram descartados. Esses resultados são atribuídos à vantagem de que com LATOR o nó coordenador responde todos os RREQs recebidos.

Quando, no processo de descoberta de rota, é respondido unicamente o primeiro RREQ, só existe uma possibilidade de caminho em cada tentativa. Então, se a resposta gerada a essa solicitação é perdida no caminho reverso, não é possível fechar a rota com sucesso. Como diferencial em LATOR, no qual o nó destino responde sempre os RREQ que chegam pelos diferentes caminhos possíveis, aumenta a probabilidade de encontrar um caminho até o destino. Pois caso algum deles se perca os outros podem alcançar o nó fonte e fechar a rota com sucesso.

Analisando as rotas utilizadas em cada uma das simulações, foi comprovado que quando um nó sensor envia um pacote de dados para o nó coordenador, nem sempre a rota direta está disponível, pela mobilidade do corpo. Também a primeira rota encontrada nem sempre corresponde ao caminho de melhor qualidade, tendendo a fechar a rota pelo caminho mais curto. Segundo é mostrado na Tabela 5.3, com o mecanismo para encontrar a primeira rota disponível, a rota 3-0 foi usada 69,78% das vezes. Entretanto, rotas com saltos de melhor qualidade foram menos utilizados, como a rota 3-1-0 17,66% das vezes e a rota 3-4-0 11,79% das vezes.

Tabela 5.3: Uso das rotas para cada protocolo de roteamento

Rotas	Rota Direta	Primeira Rota	LATOR (Max-Min)	LATOR (Min-CV)	LATOR (Max-Avg)
3 - 0	100 %	69,78 %	7,29 %	53,60 %	7,23 %
3 - 1 - 0	0 %	17,66 %	24,78 %	13,79 %	21,06 %
3 - 2 - 0	0 %	0 %	22,32 %	4,76 %	37,24 %
3 - 4 - 0	0 %	11,79 %	45,61 %	26,76 %	34,47 %
3 - 5 - 0	0 %	0,77 %	0 %	1,09 %	0 %
PDR	76,33 ± 0,15 %	78,32 ± 0,39 %	83,44 ± 0,35 %	79,42 ± 0,44 %	82,45 ± 0,37 %

Com LATOR, considerando o LQI na escolha da rota, se pode observar que diminuiu o uso da rota 3-0. Por exemplo, quando a escolha de rota foi com base no maior RSSI

mínimo, a rota 3-0 foi usada só 7,29% das vezes. E rotas com saltos de melhor qualidade foram mais utilizadas, como a rota 3-1-0 24,78% das vezes, a rota 3-2-0 22,32% das vezes e a rota 3-4-0 45,61% das vezes.

Quando a seleção de rotas do protocolo LATOR é realizada considerando a maior média (Max-Avg) de RSSI também existe um comportamento similar. Mas, nesse caso a rota 3-2-0 foi usada 37,24% das vezes e a 3-4-0 34,47% das vezes. Sendo que a rota 3-4-0 tem melhor qualidade nos enlaces e é menos utilizada comparada com a escolha de rota utilizando o maior RSSI mínimo. É por isso que na Figura 5.5, o PDR do nó 3 é levemente diminuído utilizando a maior média. Já os resultados da seleção de rotas com base no menor coeficiente de variação (Min-CV) mostram que ainda existe um maior uso da comunicação direta; devido a que sempre que se tenha disponível a rota de um salto, vai coincidir com a rota de menor coeficiente de variação. Mesmo assim, o PDR alcança melhores resultados comparado com a rota de um salto.

A análise do comportamento da seleção de rotas, que levou aos resultados apresentados na Figura 5.5, também foi realizada para os outros nós sensores. Para o nó 1, a rota direta foi a primeira rota disponível 95% das vezes e o 5% restante foi encaminhado pela rota 1-2-0. Entretanto, o protocolo LATOR utilizando o maior RSSI mínimo, só usou o caminho direto o 26,31% das vezes e passou usar a rota 1-2-0 48,12% das vezes, a rota 1-3-0 20,37% das vezes, a rota 1-4-0 foi utilizada 4,07% e a rota 1-5-0 2,10% das vezes. Sendo que a rota 1-2-0 tem os saltos com melhor qualidade que o enlace de comunicação direta e; as rotas 1-4-0 e 1-5-0 de acordo com a Tabela 1.1 não superam a comunicação direta. Mas essas rotas foram utilizadas porque foram as rotas disponíveis ou com melhores valores de RSSI no momento de realizar a descoberta de rotas. Com LATOR utilizando a maior média de RSSI como métrica, o nó 1 utiliza a rota 1-2-0 70,75% das vezes, por isso se alcança um melhor valor no PDR mostrado na Figura 5.5. Entretanto, quando a rota é escolhida considerando o menor CV, a rota direta é usada 89,97% das vezes.

Ao analisar os resultados do nó 2, o qual tem melhor qualidade na comunicação direta, observou-se que a rota direta coincidiu com a primeira rota encontrada 100% das vezes. Já com LATOR utilizando o maior RSSI mínimo, essa rota só foi utilizada 89,45% das vezes. Sendo utilizadas as rotas 2-1-0 e 2-4-0 6% e 3,6% das vezes respectivamente. Por isso se tem um resultado levemente menor comparado com a rota direta. Para a escolha de rota utilizando o menor CV, a rota 2-0 é utilizada 96,94% das vezes. No entanto, utilizando a maior média de RSSI, a rota 2-0 é usada 87,73% das vezes. Nos três critérios de seleção de rota o desempenho do PDR é semelhante.

Para o nó 4, a rota 4-0 foi a primeira encontrada 86,7% das vezes. Porém quando LATOR realiza a escolha de rota com base no maior RSSI mínimo, a rota 4-0 se utiliza só 50,40% das vezes; a rota 4-2-0 é utilizada 29,40% das vezes, sendo que nessa rota o enlace 2-0 é muito bom, mas o 4-2 tem uma qualidade similar ao caminho direto; e 20% das vezes restante foram utilizadas as rotas 4-1-0 e 4-3-0. Essas rotas têm um dos enlaces com qualidade inferior à comunicação direta. Mas elas foram as rotas disponíveis no instante da descoberta de rota com melhores valores de RSSI. O protocolo LATOR, utilizando a maior média de RSSI, escolheu a rota 4-2-0 58% das vezes e a rota 4-0 22,56% das vezes. Quando a escolha é feita utilizando o menor CV, a rota 4-2-0 é utilizada 9% das vezes, e a rota 4-0 75 11% das vezes. Embora mudou a quantidade de vezes que as rotas são usadas, ainda os resultados são similares para as três métricas de seleção de rota. Isso se deve a que nos três casos a soma da quantidade de vezes que são utilizadas as rotas 4-0 e 4-2-0 são similares.

Para o nó 5, a primeira rota encontrada foi a rota 5-0 73,7% das vezes. No entanto com base no maior RSSI mínimo só 54,2% das vezes. Quando o nó 5 escolheu a rota utilizando o menor CV, a rota direta foi usada 65,8% das vezes. Entanto, utilizando a maior média de RSSI a rota 5-0 foi usada 35,27% das vezes e a rota 5-2-0 36,73% das vezes. Essa diferença se deve principalmente a que no processo de descoberta de rota não se recebe um RREP pelo caminho direto, como causa da qualidade desse enlace. Então é usada uma rota de menor qualidade, encontrada durante a descoberta de rota. Em compensação 99,95% dos pacotes recebidos da camada de aplicação são enviados para o nó coordenador, enquanto utilizando o mecanismo para encontrar a primeira rota disponível, 322 pacotes (1,61%) são perdidos na camada de roteamento porque não foi encontrada uma rota até o nó coordenador. Como resultado, pode-se observar na Figura 5.5 que com LATOR, nos três casos, o PDR do nó 5 é menor comparado com a comunicação direta.

Na análise dos resultados mostrados, pode-se comprovar que o protocolo LATOR mantém o desempenho para os nós com enlaces diretos de boa qualidade, por exemplo os nós 1 e 2; em casos como o nó 3, onde existem rotas diferentes do caminho direto e com uma qualidade melhor, se alcançam ganhos no PDR. Porém, para nós como o 4 e 5 onde as rotas alternativas não superam significativamente ao caminho direto, em termos de qualidade, o PDR é levemente diminuído. Além disso, os resultados mostraram que o maior RSSI mínimo foi a métrica de seleção de rotas que apresentou melhor benefício para os resultados do PDR na rede do cenário utilizado.

É válido destacar que esses são os resultados utilizando o modelo de mobilidade de

corpo humano descrito em [43]. Esse modelo está limitado ao movimento de pessoas locomovendo-se a diferentes velocidades. Mas se argumenta que pelo funcionamento do protocolo proposto pode-se obter também ganhos no PDR com modelos de mobilidade de corpo que modelem outras atividades diárias das pessoas, principalmente quando se experimentam grandes trocas de posições do corpo e com períodos de longa duração.

5.4.2 Análise do controle de temperatura

Nesta seção é apresentada a avaliação do método de controle de temperatura do protocolo LATOR. Para as simulações foi utilizada uma taxa de dados de 5 pacotes por segundo (PPS) e uma carga de dados constante de 120 bytes. Neste cenário as taxas suportam aplicações de até 4 kbps, válidas para sensores médicos de baixa taxa de transmissão, como o caso de medida da temperatura corporal, saturação de oxigênio (SpO₂), medidas de glicose e pressão arterial [25]. O tempo de simulação foi de 166 minutos. Para avaliar o desempenho do protocolo LATOR e para fins de comparação, foram feitas simulações do cenário WBAN considerando a comunicação direta, a primeira rota, o protocolo LAOR e o protocolo LATOR. Para estas simulações, a escolha de rota foi feita com base no maior RSSI mínimo.

Na análise, primeiramente algumas simulações foram feitas com a finalidade de conhecer o máximo incremento de temperatura que pode gerar, tanto com a taxa de absorção específica (SAR) pela radiação da antena, quanto a potência consumida (P_c) pelo nó. Para analisar a componente de temperatura aportada pelo SAR foi considerada a transmissão contínua dos nós. Por outro lado, para a componente aportada pelo consumo de potência foi considerado um consumo de energia constante de 0,004 W para cada janela de tempo de um milissegundo. Esse valor foi obtido mediante simulação e corresponde ao maior consumo de energia registrado para uma janela de tempo de um milissegundo. Os incrementos de temperatura aportados por cada uma dessas componentes são apresentados na Figura 5.7.

Na figura, pode-se observar que a partir dos 6 mil segundos de simulação a temperatura atinge um valor estável. Se as fontes de energia não mudam, a temperatura não experimenta nenhuma mudança. Esse ponto de estabilidade é definido pela equação de transferência de calor apresentada na Seção 2.5. O gráfico mostra que o maior aumento de temperatura causado pelo SAR é de 0,3264°C e o incremento causado pela potência consumida alcança um valor máximo de 0,0471°C. Quando se consideram os dois juntos, o valor máximo alcançado é de 0,3705°C.

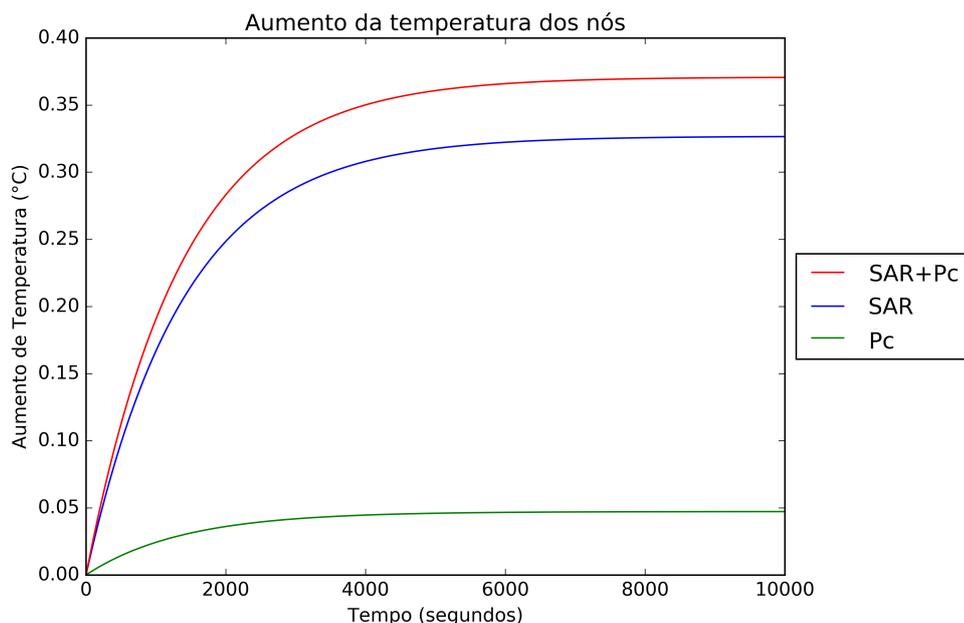


Figura 5.7: Incremento de temperatura gerado pela taxa de absorção específica e pela potência consumida dos nós.

Considerando o pior dos casos, o aumento de temperatura é mais de três vezes o valor de $0,1^{\circ}\text{C}$. Para evitar que a temperatura ultrapasse esse valor, na proposta desta dissertação, definiu-se $0,1^{\circ}\text{C}$ como limite máximo permissível para o aquecimento. Esse valor é só considerado para os nós sensores implantados. No caso do nó coordenador, como se trata de um dispositivo externo, não se considera esse limite de temperatura e não são tomadas ações contra o aquecimento. Esta decisão tem como base que a transferência de calor não ocorre de forma direta ao tecido, já que existe uma camada de ar que atua como isolante no contato com a pele. Nesse contexto, considera-se que o aumento de temperatura no pior dos casos não causaria danos à pele.

Os resultados apresentados na Figura 5.7 mostraram que para o cenário descrito, o equilíbrio térmico acontece em valores abaixo do limite de $0,1^{\circ}\text{C}$. Por isso, para analisar o desempenho do método de prevenção de superaquecimento proposto nesta dissertação, se definiu um limite do aumento da temperatura de $0,00175^{\circ}\text{C}$ para os nós sensores. Dessa forma, quando a temperatura supera esse novo limite definido, se inicia o procedimento de notificação do aquecimento e troca de rota. A avaliação do controle de temperatura proposto no protocolo LATOR é apresentada tomando como referência o nó 3 atuando como transmissor.

Na Figura 5.8 se mostram os valores do aumento de temperatura dos nós da rede, quando o nó 3 atua como transmissor. Segundo pode se ver na Figura 5.8(a) quando é utilizada a primeira rota, o nó 1 experimenta maior aumento de temperatura porque ele

atua como nó retransmissor na maioria do tempo. No entanto, com o protocolo LAOR, o nó 4 experimenta um maior aumento na sua temperatura, segundo mostrado na Figura 5.8(b). Nesse caso o aumento da temperatura experimentado pelo nó 4 é devido ao fato que, na maioria da vezes, ele atua como nó retransmissor do nó 3. Isso ocorre porque a rota 3-4-0 é a rota de melhor qualidade na maioria das vezes.

Nos resultados apresentados na Figura 5.8(c), pode-se apreciar que com LATOR o aumento de temperatura não ultrapassa o limiar definido, evitando o superaquecimento dos nós da rede. O controle de temperatura é ativado a primeira vez no segundo 2395 pelo nó 4; quando este alcança o estado de superaquecimento. A partir desse momento a rota 3-1-0 é mais utilizada até o segundo 6400, atingindo 5 vezes o estado de superaquecimento, nesse intervalo de tempo. Depois disso, a rota 3-4-0 é utilizada novamente.

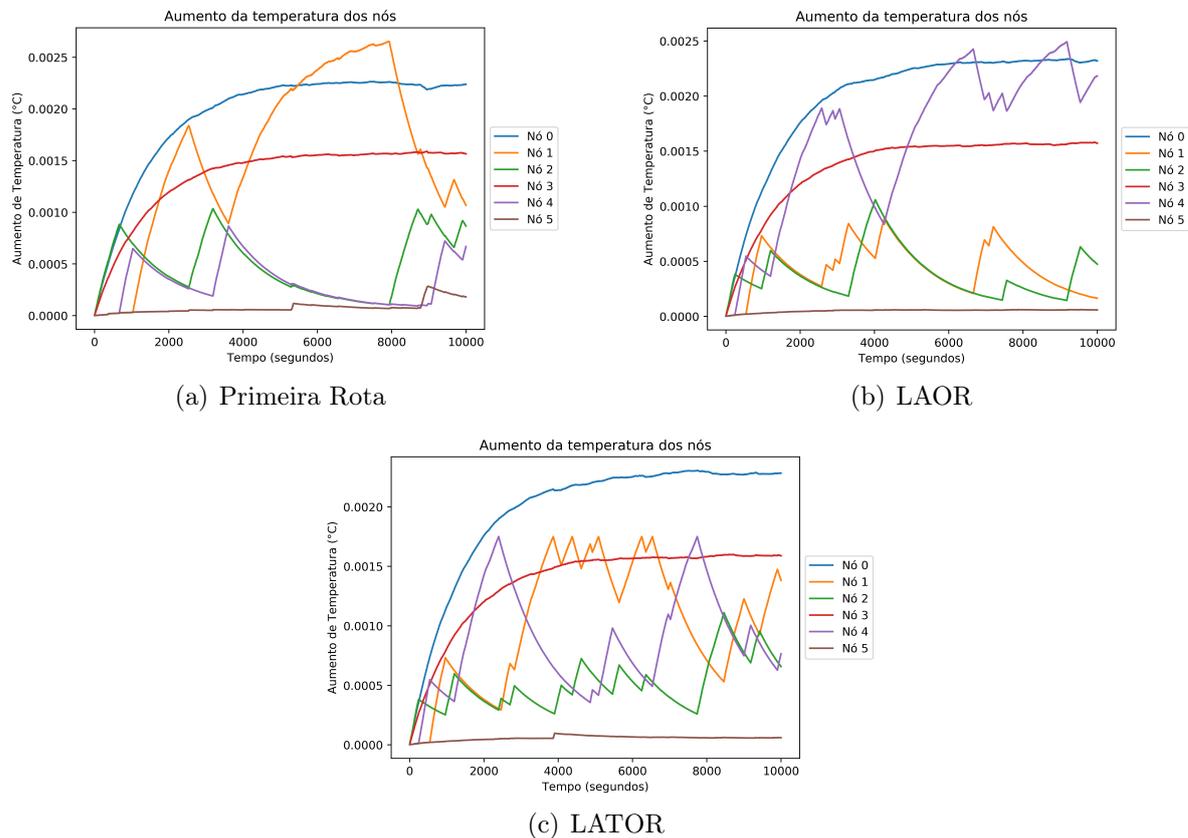


Figura 5.8: Comportamento da temperatura dos nós. Nó 3 atuando como transmissor.

Esses resultados mostram que o método proposto para o controle de temperatura funciona corretamente. Mas é importante analisar a influência desse método no desempenho de outros parâmetros como a latência e o PDR. Na Figura 5.9, é apresentada uma comparação do PDR considerando a rota direta, a primeira rota, LAOR e LATOR.

Os resultados para o nó 3 mostraram que o enlace direto, rota 3-0, tem uma qualidade

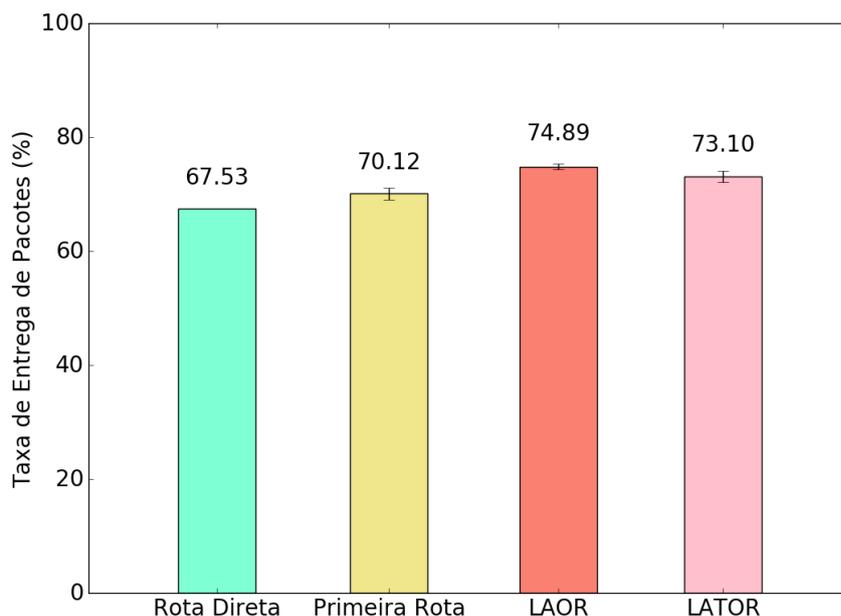


Figura 5.9: PDR quando o nó 3 atua como transmissor.

baixa; o qual favorece a existência de rotas alternativas de melhor qualidade. Utilizando a rota direta, o nó 3 obtém um PDR de $67,53 \pm 0,01\%$. Usando a primeira rota encontrada se alcançou um PDR de $70,12 \pm 1,03\%$, utilizando a rota 3-1-0 60,57% das vezes e a rota 3-2-0 23,26% das vezes. Tanto LAOR quanto LATOR melhoram o PDR do nó 3, alcançando um PDR de $74,89 \pm 0,48\%$ e $73,10 \pm 0,98\%$ respectivamente. LAOR usou a rota 3-1-0 15% das vezes, a rota 3-2-0 16,81% das vezes e a rota 3-4-0, de melhor qualidade, é usada 68,18% das vezes favorecendo o aumento do PDR. LATOR ativa o processo de troca de rota quando o nó 4 está super-aquecido e, fica temporariamente inabilitado para atuar como retransmissor. Então a rota 3-4-0 só é usada 33,55% das vezes. Por isso, o PDR diminuiu comparado com LAOR, mas ainda oferece resultados melhores comparados com a rota direta e a primeira rota.

Os resultados mostram que utilizando a primeira rota, 28,30% (14150 pacotes) dos pacotes transmitidos pelo nó 3 foram retransmitidos pelo nó 1, quando este já tinha alcançado o valor de aumento de temperatura a partir do qual é considerado o superaquecimento. O protocolo LAOR permite melhorar o PDR a partir da escolha de rotas com base no LQI. Apesar disso, 36,45% (18227 pacotes) dos pacotes transmitidos pelo nó 3 foram retransmitidos pelo nó 4, quando este já tinha alcançado o estado de superaquecimento. Entretanto, o protocolo LATOR garante que não sejam feitas transmissões quando o nó está super-aquecido. Este aspecto é significativamente importante, devido ao prejuízo que o aumento da temperatura pode causar ao tecido do corpo.

A Figura 5.10 mostra o número de pacotes com uma dada latência para os pacotes

transmitidos pelo nó 3. Este executa mais vezes a descoberta de rotas e, em consequência, os dados transmitidos por ele são os que possuem maior latência. Na figura, é visível que, quando se utiliza a rota direta, há um maior número de pacotes com latência dentro os primeiros 100 milissegundos. Para a primeira rota, LAOR e LATOR têm um comportamento semelhante, aumentando a latência para alguns pacotes, comparado com a rota direta.

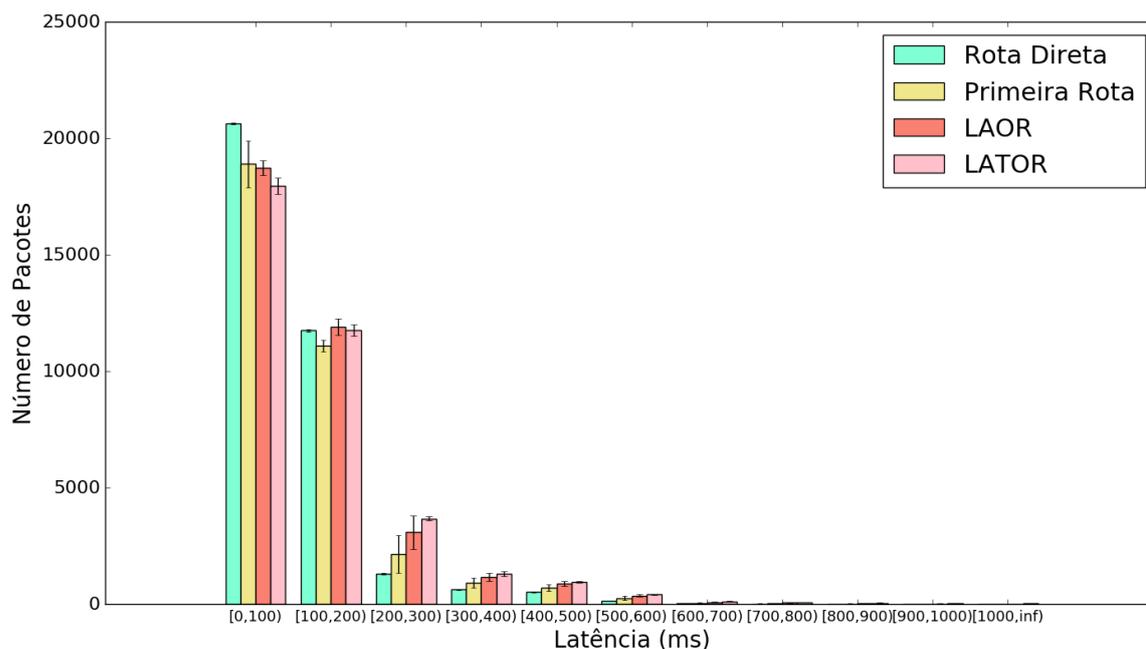


Figura 5.10: Distribuição da latência dos pacotes transmitidos pelo nó 3.

Com o protocolo LATOR, diminui a quantidade de pacotes no intervalo entre zero e 100 ms de latência, aumentando principalmente nos intervalos entre 100 e 500 milissegundos. Com a rota direta 0,8% dos pacotes recebidos têm uma latência maior que 500 ms; com a primeira rota encontrada 1,8%; LAOR 2,02% e LATOR 2,16%. Esse aumento de latência comparado com o caminho direto se deve principalmente à demora do processo de descoberta de rotas.

Na Figura 5.11, se mostra o intervalo entre os 7640 e 8040 segundos de simulação, da série temporal de latência para os pacotes transmitidos pelo nó 3 utilizando o protocolo LATOR. Na figura, pode-se observar a ocorrência de três picos acima de 800 milissegundos (picos 1, 2 e 3). Esse aumento de latência é devido principalmente à demora do processo de descoberta de rotas. Na Figura 5.11, os picos 1 e 2 correspondem à demora de uma tentativa de descoberta de rota. No caso do pico 3 com latência acima de 1750 milissegundos, este ocorre quando a rota só foi encontrada na segunda tentativa de descoberta consecutiva.

De forma geral, o protocolo LATOR aumenta a latência dos pacotes. Em presença do aquecimento é ativada mais vezes a descoberta de rota, pois além das buscas de rotas ativadas pelas quebras dos enlaces, também têm as geradas pelo superaquecimento.

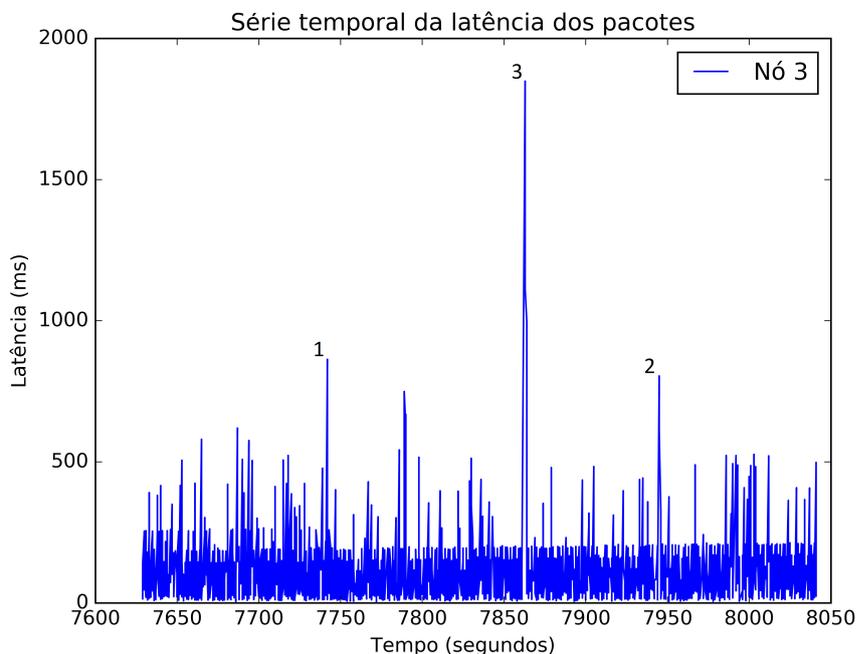


Figura 5.11: Série temporal da latência dos pacotes transmitidos pelo nó 3 utilizando LATOR.

A análise também foi realizada para os outros nó da rede. Na Figura 5.12 se mostram os valores de temperatura quando o nó 1 é o nó transmissor. Segundo pode-se ver na Figura 5.12(a), utilizando a primeira rota disponível, a rota 1-0 foi utilizada 100% das vezes. Então, nenhum nó intermediário experimentou um aumento de temperatura. Entretanto, pode-se ver na Figura 5.12(b) que para o protocolo LAOR, o nó 2 experimenta um maior aumento na sua temperatura nos primeiros 3800 segundos, porque ele na maioria das vezes atua como nó retransmissor do nó 1 na rota 1-2-0.

Quando é usado o protocolo LATOR, segundo a Figura 5.12(c) a temperatura do nó 2 começa a aumentar até atingir o limite definido. Esse aumento se deve a que o nó 2 é utilizado mais como retransmissor, pois a rota 1-2-0 é a de melhor qualidade para encaminhar os dados transmitidos pelo nó 1. Como resultado, a temperatura do nó 2 começa a aumentar até atingir o valor limite definido. Esse valor é alcançado pela primeira vez aos 3180 segundos. Nesse instante, o nó 2 envia a notificação do seu aquecimento para o nó transmissor. O nó 1, quando recebe a notificação, troca de rota e começa usar o caminho direto. Nesse momento, o nó 2 começa a esfriar. Imediatamente depois, observa-se a existência de mais dois picos nos quais novamente o nó 2 alcança o limite de temperatura definido. Entre o primeiro e o terceiro picos na temperatura do nó 2,

aconteceram trocas de rotas, onde se retomou o uso do nó 2 como retransmissor. Nesses casos, a troca de rota não foi gerada por aquecimento, mas por quebras do enlace enquanto se utilizavam as rotas 1-0, 1-3-0 e 1-4-0. Depois do terceiro pico de temperatura do nó 2, a rota 1-3-0 começa a ser utilizada, até que o nó 3 atinge a máxima temperatura permitida. Nesse caso, é o nó 3 quem ativa o balanceamento de carga para evitar o superaquecimento.

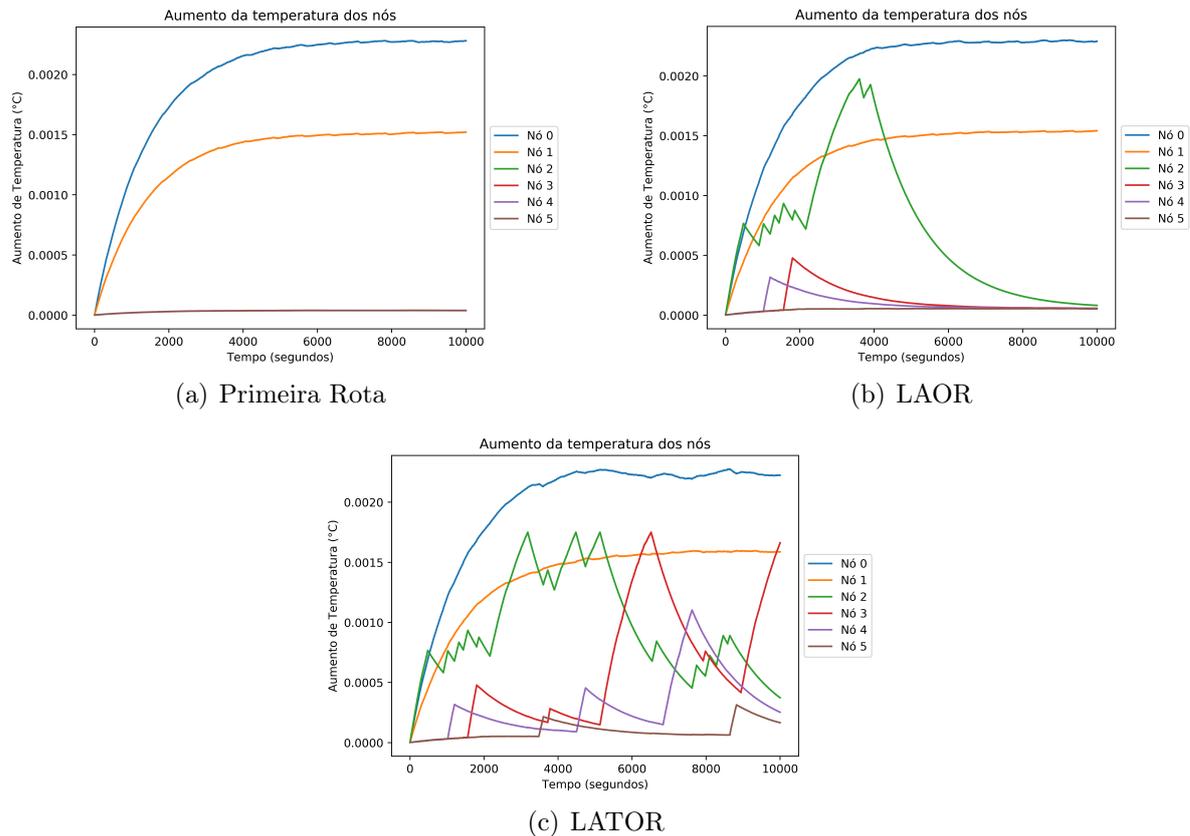


Figura 5.12: Comportamento da temperatura dos nós. Nó 1 atuando como transmissor.

Para o nó 1, tanto a rota direta quanto a primeira rota têm resultados similares utilizando 100% das vezes o enlace 1-0, obtendo um PDR de 74,59% e 74,81% respectivamente. Por sua parte, o protocolo LAOR alcança 75,89% de PDR utilizando a rota 1-0 70,59% das vezes. O PDR é levemente maior porque passou usar a rota 1-2-0 de melhor qualidade 25,20% das vezes. No entanto, LATOR diminui levemente o PDR (72,63%) porque quando o nó 2 chega ao estado de superaquecimento fica temporariamente inabilitado para atuar como retransmissor, então é usada a rota 1-3-0 27,96% das vezes. Essa rota não supera a qualidade da comunicação direta, mas foi a que estava disponível com melhores valores de RSSI no momento de realizar a descoberta de rota.

Para o nó 4 atuando como transmissor, a primeira rota encontrada foi a rota direta 100% das vezes. Por outra parte, o protocolo LAOR utilizou mais vezes a rota 4-3-0; é por

isso que o nó 3 experimenta um maior aumento da temperatura, segundo se mostra na Figura 5.13(b). No entanto, com o protocolo LATOR, segundo é apresentado na Figura 5.13(c), inicialmente o nó 2 é utilizado como retransmissor dos dados transmitidos pelo nó 4 nos primeiros 1600 segundos da simulação. A partir desse momento, a rota disponível de melhor qualidade é a rota 4-3-0. No segundo 3502 o nó 3 alcança seu primeiro pico de temperatura. A partir desse momento se pode observar que a função de retransmissor é revesada entre os nós 3 e 2, acontecendo trocas de rotas causadas tanto pelo aquecimento, quanto pela quebra dos enlaces pelo movimento do corpo.

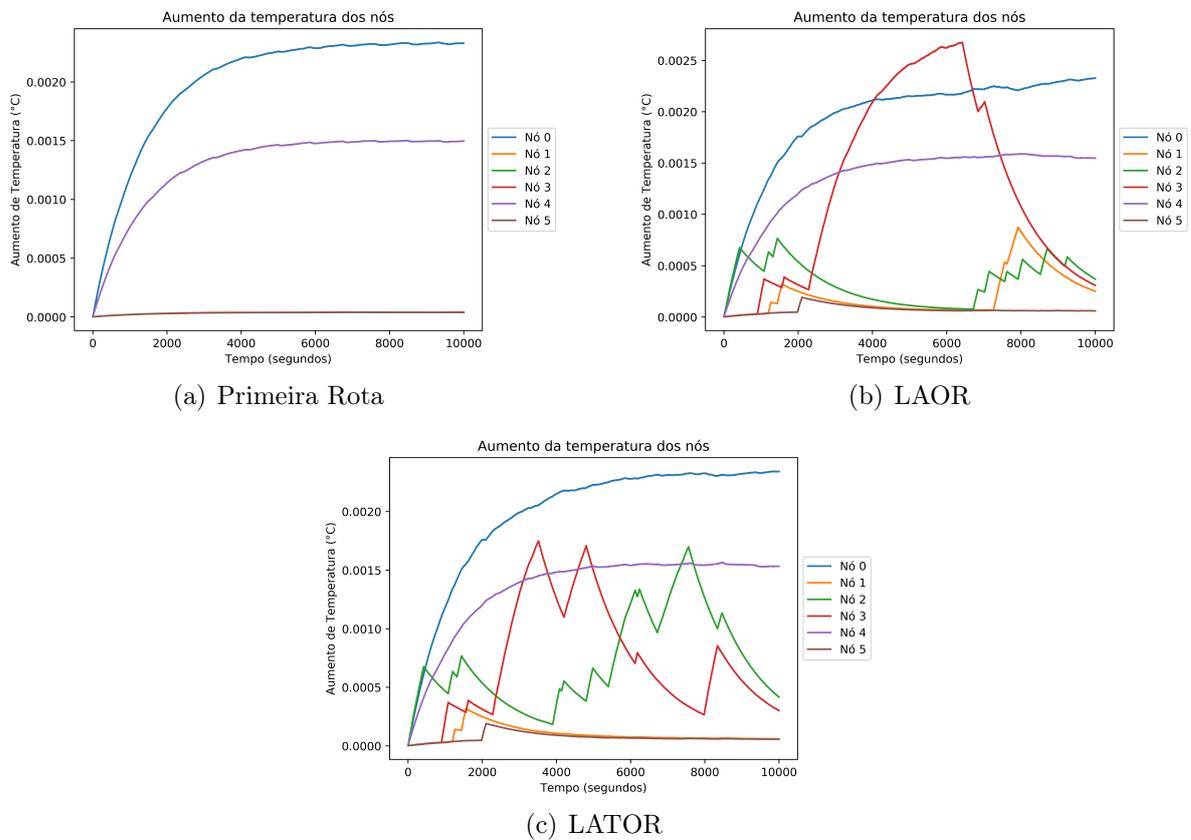


Figura 5.13: Comportamento da temperatura dos nós. Nó 4 atuando como transmissor.

Para o nó 4, a primeira rota utiliza 100% das vezes a rota direta. É por isso que oferece resultados similares de PDR, sendo 78,09% e 77,85% respectivamente. Com LAOR foi alcançado 72,68% de PDR. Nesse caso, a rota 4-3-0 foi usada o 45,61% das vezes; essa foi a rota com melhores valores de RSSI no momento de realizar a descoberta de rota. Porém, no cenário analisado, o enlace 3-0 é o mais afetado pela variação temporal do canal sem fio; por isso o PDR diminuiu comparado com a rota direta. Por sua vez, LATOR, quando realiza o controle de temperatura, realiza mais vezes o processo de descoberta de rotas atualizando a tabela de rotas com mais frequência. Nesse caso, a rota 4-3-0 foi usada o 24,95% das vezes, a qual favoreceu o aumento do PDR comparado com LAOR,

alcançando 74,82% de PDR.

No caso da Figura 5.14, onde o nó 2 atua como transmissor, utilizando a primeira rota disponível sempre se utilizou a rota direta; é por isso que na Figura 5.14(a) não existe aumento de temperatura de nós intermediários. Entretanto, LAOR e LATOR, têm o mesmo comportamento. Em ambos casos, na maioria das vezes se utiliza a rota direta e em poucas vezes a rota 2-4-0, por isso o nó 4 experimenta um leve aumento da temperatura duas vezes. A rota direta é mais utilizada porque tem a melhor qualidade da rede. Em ambos os casos, o uso do caminho 2-4-0 se deve à rota disponível no instante da descoberta de rota. A troca de rota por aquecimento não é efetuada porque o nó retransmissor não alcançou o estado de superaquecimento.

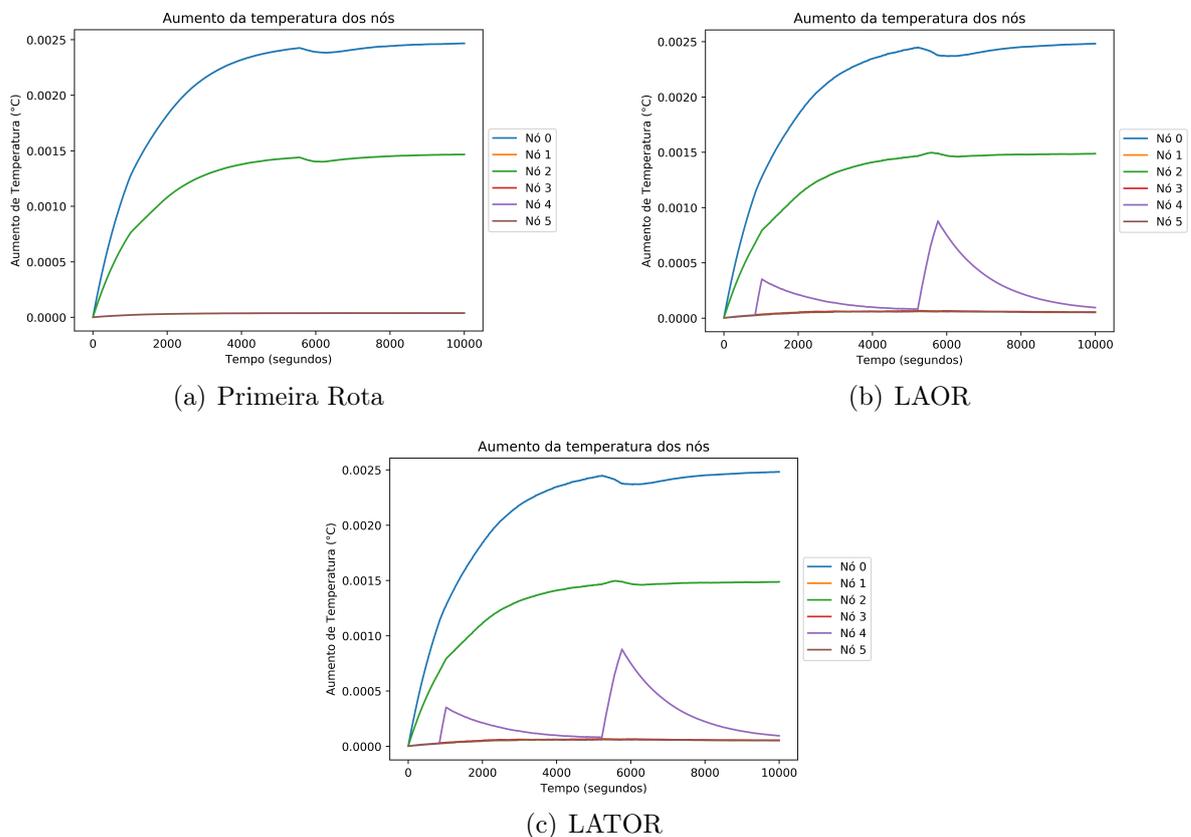


Figura 5.14: Comportamento da temperatura dos nós. Nó 2 atuando como transmissor.

Quando se analisam os resultados do nó 2, o qual tem a melhor qualidade na comunicação direta, 100% das vezes foi utilizada a rota 2-0 utilizando a primeira rota encontrada, obtendo um 85,45% de PDR. Tanto para LAOR quanto LATOR diminui levemente o PDR (84,50%) porque a rota 2-4-0 foi utilizada o 4,12% das vezes.

Para o nó 5 atuando como transmissor, a primeira rota encontrada coincidiu com a rota direta todas as vezes. Os protocolos LAOR e LATOR têm o mesmo comportamento.

Ambos utilizam a maioria das vezes a rota direta, que embora não seja de boa qualidade é a melhor possível para encaminhar os dados para o nó coordenador. O nó 1 foi utilizado como retransmissor unicamente quando a rota direta não estava disponível.

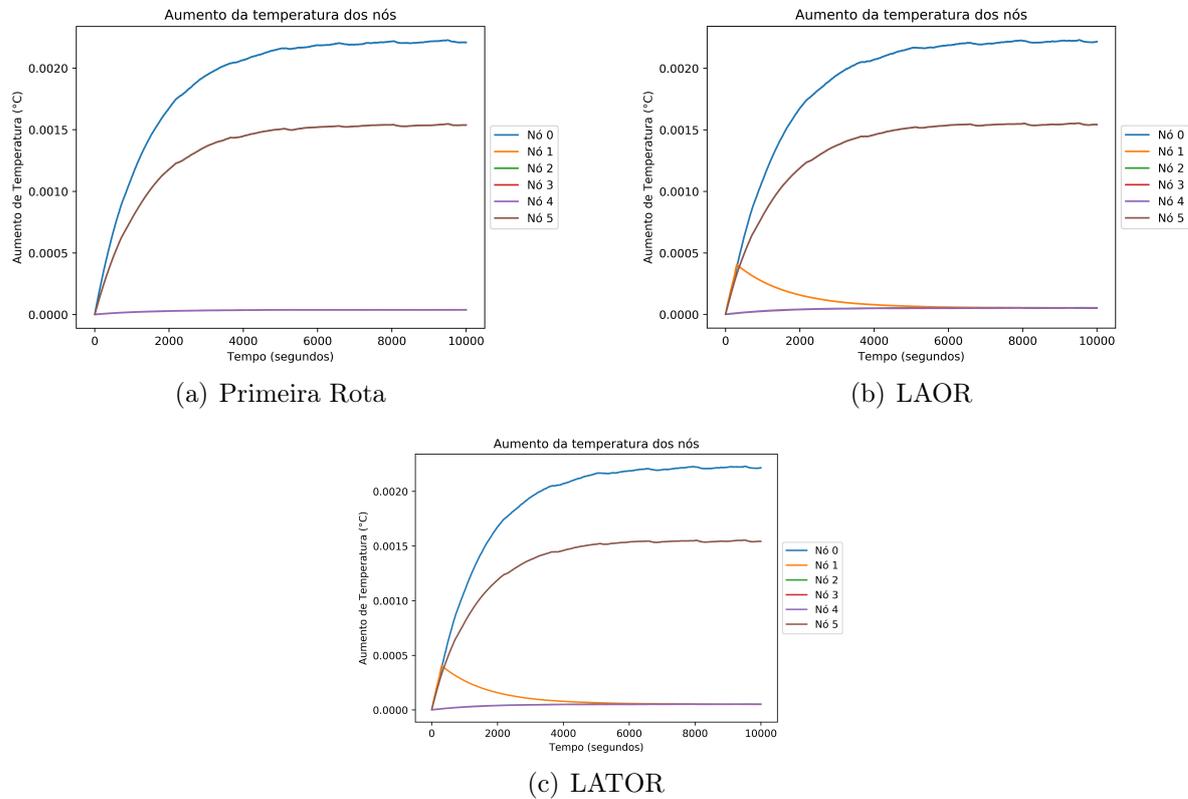


Figura 5.15: Comportamento da temperatura dos nós. Nó 5 atuando como transmissor.

Para o nó 5 o comportamento é similar, sendo utilizada a rota 5-0 100% das vezes na comunicação direta e na primeira rota, alcançando um PDR de 70,22% e 70,46% respectivamente. Para LAOR e LATOR a rota 5-0 e usada 97% das vezes e a rota 5-1-0 3% das vezes, obtendo um PDR de 69,56%. Em ambos casos, as rotas alternativas encontradas têm menor qualidade que a rota direta, mas foram as disponíveis no momento de realizar a descoberta de rota. Também, LAOR e LATOR têm os mesmos resultados porque, como se utiliza mais a rota direta, o nó retransmissor não chegou ao superaquecimento.

Os resultados mostram que o protocolo LATOR melhora o desempenho em situações similares ao do nó 3 do cenário analisado. Esses resultados são obtidos utilizando o modelo de mobilidade de corpo humano, limitado ao movimento de pessoas andando a diferentes velocidades [43]. Então, acredita-se que para outros modelos de mobilidade, possam existir mais nós em condições semelhantes ao nó 3, sendo beneficiados com o uso de LATOR.

Na análise apresentada, para facilitar a apresentação dos resultados, foi analisado o

comportamento do protocolo LATOR considerando unicamente um nó sensor atuando como transmissor. Mas numa rede real todos os nós operam simultaneamente na coleta de dados e os transmitem para o nó coordenador, de acordo com as características de cada aplicação. Na Figura 5.16, é apresentado o comportamento da temperatura quando todos os nós estão transmitindo simultaneamente. Nesse cenário, os nós sensores transmitem seus próprios dados e alguns deles atuam como retransmissores de outros.

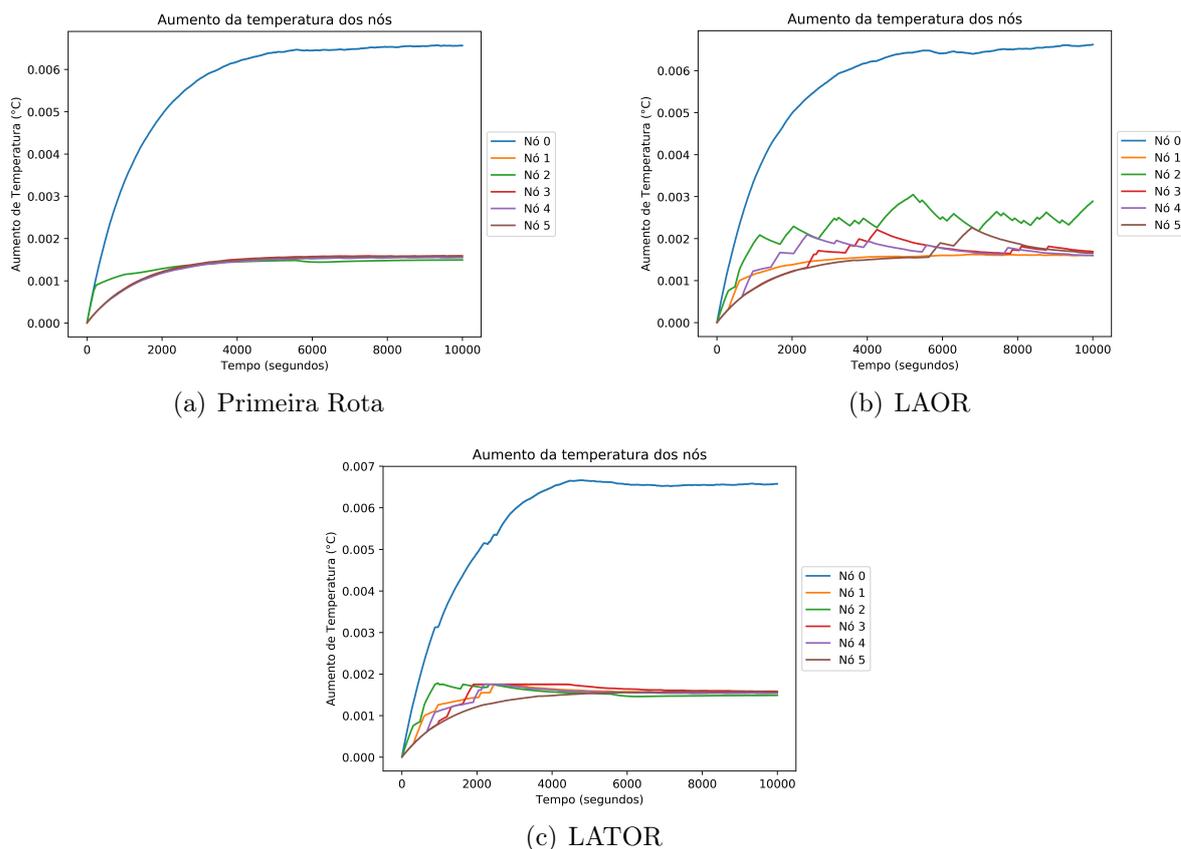


Figura 5.16: Comportamento da temperatura com todos os nós transmitindo.

Por exemplo, na Figura 5.16(b), se pode ver que o nó 2 experimenta um maior aumento da temperatura durante toda a simulação. Esse aumento se deve a que, na maioria das vezes, atua como retransmissor dos nós 1 e 4. De forma similar acontece com o nó 4 quanto atua como retransmissor do nó 3. No entanto, em presença de superaquecimento dos nós se pode apreciar na Figura 5.16(c) que o aumento da temperatura de nenhum dos nós ultrapassa o limite definido para o estado de superaquecimento.

Na Figura 5.17 é apresentado o PDR alcançado para cada nó, quando todos os nós sensores transmitem simultaneamente. Pode-se ver que o nó 3 continua sendo beneficiado tanto com LAOR quanto LATOR. No entanto, para os outros nós da rede o desempenho do PDR com o LATOR é similar à comunicação direta e à primeira rota encontrada.

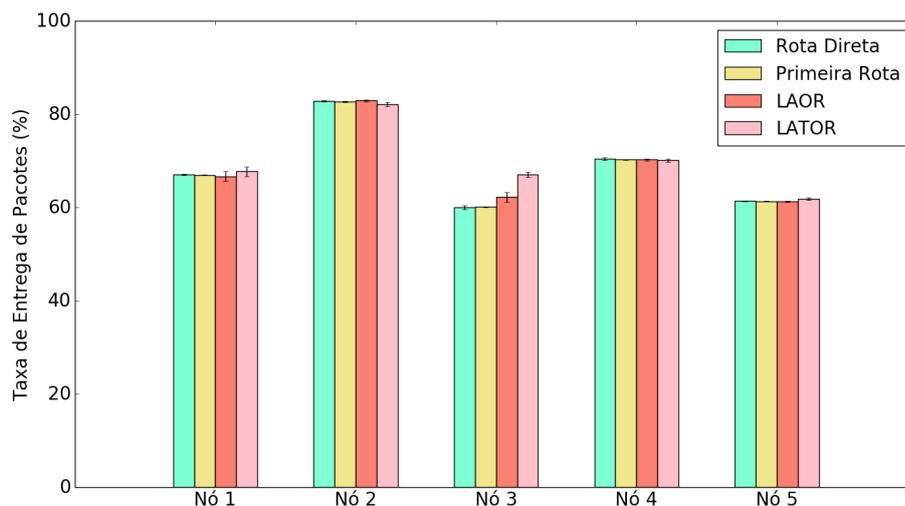


Figura 5.17: PDR para cada nó transmissor.

Na Figura 5.18 se mostra a latência dos pacotes transmitidos na rede quando todos os nós sensores operam simultaneamente. De forma geral, a latência tem um comportamento similar aos resultados anteriores. Porém, pode-se observar que com LATOR existe um aumento considerável de pacotes na rede que experimentaram uma latência acima de um segundo.

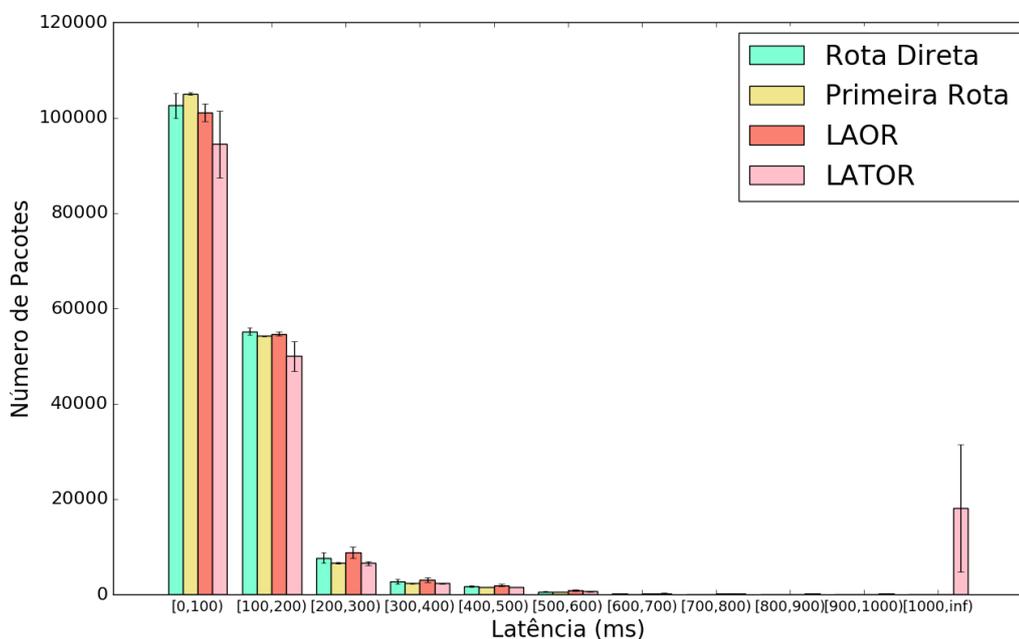


Figura 5.18: Distribuição da latência dos pacotes transmitidos na rede.

Esses resultados se devem a que o nó 3 chegou ao estado de superaquecimento e permaneceu, pela alta atividade da rede, oscilando na vizinhança do limite máximo de aumento de temperatura definido. Nesse caso, enquanto o nó 3 estava super-aquecido ele não atuou como retransmissor, mas os próprios dados dele tiveram que esperar pelo

esfriamento do nó 3 para serem transmitidos. Essa situação provocou um aumento importante da latência para os pacotes transmitidos pelo nó 3. Este resultado está relacionado à precisão do modelo utilizado para estimar o aumento de temperatura. Daí a importância de uma boa aproximação da FDTD utilizada no modelado do comportamento da temperatura dos nós.

Uma estimação da temperatura com um menor intervalo de tempo discretizado permite maior precisão no cálculo da temperatura. Então o estado de superaquecimento é detectado com maior precisão e conseqüentemente um nó deve esperar menos tempo para sair do estado de superaquecimento. Também prevê-se que esta situação é minimizada em cenários WBANs onde os nós podem ter sensores para medir sua própria temperatura. Neste caso prático, o modelo de cálculo da temperatura não seria utilizado.

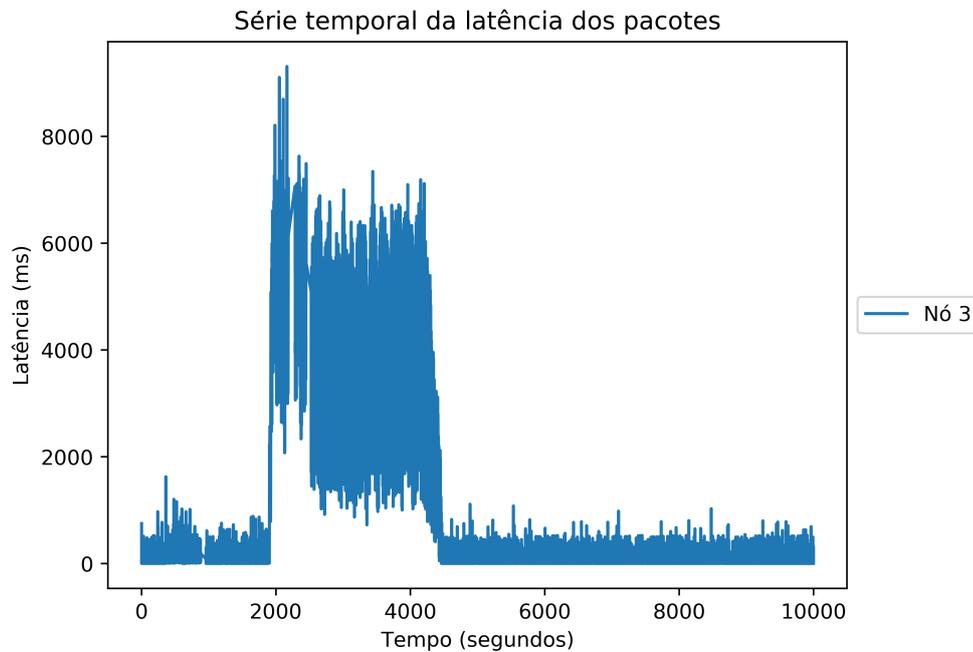


Figura 5.19: Série temporal da latência dos pacotes transmitidos pelo nó 3.

Segundo se pode ver na Figura 5.19, entre o segundo 1906 e 4454, os pacotes transmitidos pelo nó 3 experimentaram uma latência entre um e nove segundos. Em compensação o protocolo garante que não aconteça o superaquecimento dos nós na rede, aspecto que é muito importante para não provocar danos aos tecidos do corpo humano onde sejam implantados os nós WBAN. As latências dentro dessa faixa de valores são altas. Porém, é considerado que dependendo da aplicação e do cenário utilizado, o protocolo proposto poderia ser uma alternativa viável. Por exemplo, em aplicações onde os valores dos parâmetros medidos não mudam bruscamente em poucos segundos, como no caso da temperatura corporal e nível de glicose no sangue.

Das análises apresentadas neste capítulo, se comprovou que o mecanismo para evitar o aquecimento dos nós em WBAN é uma alternativa viável. Com esse método, os nós não ultrapassam o limite de temperatura definido, selecionando sempre as melhores rotas disponíveis no instante do processo de descoberta de rota. Se comprovou que, nos casos onde a comunicação direta tem uma qualidade baixa, LATOR tem os melhores ganhos no desempenho do PDR.

Capítulo 6

Conclusão

Nesta dissertação foi apresentado o protocolo LATOR como uma proposta para melhorar a taxa de entrega de pacotes na comunicação Intra-WBAN com prevenção do superaquecimento dos nós. Este protocolo tem a vantagem de evitar o aquecimento dos tecidos do corpo humano, considerando unicamente a própria temperatura do nó sem necessidade de trocar informação de temperatura entre nós vizinhos; o que permite uma diminuição no tráfego de pacotes de controle.

Inicialmente como resultado da análise do estado da arte, identificou-se o particionamento topológico causado pelo movimento do corpo como um dos principais desafios a serem enfrentados em WBAN. Revelou-se a importância de evitar o aquecimento para não causar danos nos tecidos do corpo onde possa ser implantado um nó WBAN. Também observou-se que as principais fontes que contribuem ao aquecimento dos nós são a Taxa de Absorção Específica (SAR), produto da radiação da antena transmissora e a densidade de potência devido ao consumo energético dos nós.

Na pesquisa bibliográfica se encontrou um número considerável de trabalhos relacionados com o roteamento em WBAN, porém a maioria deles foram desenvolvidos antes da publicação do padrão WBAN. Então, provavelmente por isso, não se ajustam a alguns aspectos definidos, como principalmente o uso de topologia em estrela com limitação de dois saltos no máximo. Depois da publicação do padrão WBAN, os trabalhos se focaram mais na seleção de nós retransmissores. Nesses trabalhos a seleção do retransmissor teve como métricas a energia e a temperatura, sem considerar aspectos como a qualidade da rota.

Baseados nesses aspectos identificados na análise do estado da arte, surgiu a ideia do protocolo LATOR apresentado nesta dissertação. Este protocolo visa melhorar a Taxa

de Entrega de Pacotes (PDR) quando a comunicação direta entre os nós sensores e o nó coordenador tem baixa qualidade e existe alguma rota, com até dois saltos, de qualidade melhor comparada com a rota direta. LATOR escolhe uma rota alternativa dentre todas as disponíveis e propõe um método de manutenção de rota que permite identificar as quebras dos enlaces a partir do movimento do corpo. LATOR permite que cada nó estime sua temperatura, baseado na sua própria atividade e evita o superaquecimento dos nós com referência a um valor máximo permitido.

LATOR foi implementado e avaliado utilizando o *framework* Castalia, simulador desenvolvido para Redes de Sensores Sem Fio (WSN), Redes Pessoais (PAN) e, em geral, redes de dispositivos de baixa potência. A avaliação foi feita por meio de simulação, utilizando parâmetros experimentais do comportamento do canal sem fio no corpo humano e considerando a mobilidade do corpo humano. Para isso, foi utilizado um mapa de perda de caminho e um modelo de variação temporal baseado em medições feitas experimentalmente no corpo humano; ambos disponíveis no Castalia.

Na avaliação de desempenho do protocolo proposto, se comparou o desempenho da seleção de rotas considerando: o maior RSSI mínimo, maior media de RSSI e o menor coeficiente de variação. Para o cenário utilizado, os resultados mostraram que, quando a rota é selecionada considerando o maior RSSI mínimo, se logram os melhores resultados na taxa de entrega de pacotes, pois resultam mais beneficiados os nós que têm a menor qualidade dos enlaces na comunicação direta.

Na análise dos resultados mostrados, comprovou-se que o protocolo LATOR mantém o desempenho para os nós com enlaces diretos de boa qualidade; em casos onde existem rotas diferentes ao caminho direto e com uma qualidade melhor, se alcançam ganhos no PDR. Porém, quando as rotas alternativas não superam significativamente o caminho direto, em termos de qualidade, o PDR pode ser levemente diminuído.

Das análises realizadas com foco no mecanismo para evitar o aquecimento dos nós em WBAN, se comprovou que nenhum dos nós da rede ultrapassou o limite de aumento de temperatura definido. Sempre que o nó retransmissor alcançou o estado de superaquecimento se realizou o processo de troca de rota com sucesso. Dessa forma, se consegue realizar um balançamento de carga na rede, selecionando sempre as melhores rotas disponíveis no instante do processo de troca de rota. Se comprovou que os casos onde a comunicação direta tem uma qualidade baixa continuam tendo os melhores ganhos no desempenho do PDR. Os resultados mostraram que com LATOR aumenta a latência, principalmente nos casos onde a qualidade dos enlaces é baixa e em presença de supera-

quecimento; já que o processo de descoberta de rota é realizado mais vezes, ou se deve de esperar pelo esfriamento do nó respectivamente. Apesar disso, a latência permanece em valores aceitáveis para aplicações WBAN.

Considerando os resultados obtidos, se considera que a proposta deste trabalho, LATOR, é uma alternativa válida para o roteamento em WBANs. Pois uma vez que se considera uma métrica de qualidade do canal, melhores rotas podem ser escolhidas sempre que existe um caminho de maior qualidade comparado com a comunicação direta entre o nó sensor e o coordenador. A proposta permite manter o desempenho da comunicação direta quando a qualidade do enlace é boa, enquanto é capaz de melhorar o PDR optando por rotas diferentes da comunicação direta, quando ela é de baixa qualidade.

Como trabalho futuro, pretende-se otimizar a seleção de caminhos para garantir que nunca sejam escolhidas rotas de qualidade inferior à comunicação direta. Nesse sentido uma opção a considerar é a inclusão de uma fase de configuração inicial para determinar a probabilidade de perdas de pacote por cada rota, e considerá-la como outra métrica na seleção de rotas. Uma outra linha de pesquisa futura refere-se ao controle de potência de transmissão de nós sensores origem e intermediários. Para comunicação direta, nós precisam transmitir a uma potência alta para não perder a conectividade com o nó coordenador. Com o uso do LATOR, nós sensores fonte e intermediários podem transmitir em potências menores, possibilitando menor aquecimento dos nós. Também se considera oportuno avaliar o comportamento do protocolo proposto com outros modelos de mobilidade do corpo ou em um *testbed*. Adicionalmente, considerar e avaliar o consumo energético é um aspecto importante para permitir o maior tempo de vida da bateria dos sensores.

Referências

- [1] AHMED, S.; JAVAID, N.; AKBAR, M.; IQBAL, A.; KHAN, Z. A.; QASIM, U. Laeeba: Link aware and energy efficient scheme for body area networks. In *2014 IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications* (2014), IEEE, pp. 435–440.
- [2] AL MASUD, S. M. R. Qos taxonomy towards wireless body area network solutions. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)* 2 (2013), 221–234.
- [3] BAG, A.; BASSIOUNI, M. A. Energy efficient thermal aware routing algorithms for embedded biomedical sensor networks. In *2006 IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems* (2006), IEEE, pp. 604–609.
- [4] BAG, A.; BASSIOUNI, M. A. Hotspot preventing routing algorithm for delay-sensitive biomedical sensor networks. In *IEEE International Conference on Portable Information Devices* (2007), IEEE, pp. 1–5.
- [5] BHANUMATHI, V.; SANGEETHA, C. A guide for the selection of routing protocols in wban for healthcare applications. *Human-centric Computing and Information Sciences* 7, 1 (2017), 24.
- [6] BOULIS, A. Castalia. a simulator for wireless sensor networks and body area network. *NICTA: National ICT Australia* (2011).
- [7] CABACAS, R.; YANG, H.; RA, I.-H. Energy-efficient two-hop transmission prioritization scheme for wireless body area networks. In *2014 Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)* (2014), IEEE, pp. 1213–1218.
- [8] CABALLERO, E.; FERREIRA, V.; LIMA, R.; ALBUQUERQUE, C.; MUCHALUAT, D. Lator: Link-quality aware and thermal aware on-demand routing protocol for wban. In *International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)* (2020).
- [9] CABALLERO, E.; FERREIRA, V.; LIMA, R.; ALBUQUERQUE, C.; MUCHALUAT, D. Protocolo de roteamento ciente de qualidade com prevenção de aquecimento para redes corporais sem fio. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (2020).
- [10] CAVALLARI, R.; MARTELLI, F.; ROSINI, R.; BURATTI, C.; VERDONE, R. A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16, 3 (2014), 1635–1657.

- [11] CULPEPPER, B. J.; DUNG, L.; MOH, M. 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 (2004), 61–83.
- [12] EFFATPARVAR, M. D.; MASOUD, A. A comprehensive survey of energy-aware routing protocols in wireless body area sensor networks. *Journal of medical systems* 40, 9 (2016).
- [13] FERREIRA, V.; CABALLERO, E.; LIMA, R.; BALBI, H.; SEIXAS, F.; ALBUQUERQUE, C.; MUCHALUAT, D. Redes corporais sem fio: Uma visão geral e suas aplicações à saúde. In *Anais do CSBC 2018. XXXVII JAI, JORNADAS DE ATUALIZAÇÃO EM INFORMÁTICA* (2018), SBC, pp. 147–198.
- [14] FERREIRA, V.; MUCHALUAT, D.; ALBUQUERQUE, C. Estudo sobre estabilidade de rotas em redes corporais sem fio. In *Escola Regional de Computação Aplicada à Saúde (ERCAS-RJ 2018)* (2018), SBC.
- [15] GROUP, I. . W., ET AL. 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, Feb. 2012.
- [16] HAO, Y.; FOSTER, R. Wireless body sensor networks for health-monitoring applications. *Physiological Measurement* 29, 11 (2008).
- [17] HAVENITH, G. Individualized model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response. *Journal of Applied Physiology* 90, 5 (2001), 1943–1954.
- [18] HE, W.; GOODKIND, D.; KOWAL, P. An aging world, 2016. Disponível em =<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.1088.9362>.
- [19] HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences* (2000), IEEE, pp. 10–pp.
- [20] HIRATA, A.; SHIOZAWA, T. Correlation of maximum temperature increase and peak sar in the human head due to handset antennas. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques* 51, 7 (2003), 1834–1841.
- [21] JAVAID, N.; AHMAD, A.; KHAN, Y.; KHAN, Z. A.; ALGHAMDI, T. A. A relay based routing protocol for wireless in-body sensor networks. *Wireless Personal Communications* 80, 3 (2015), 1063–1078.
- [22] KHAN, Z.; ASLAM, N.; SIVAKUMAR, S.; PHILLIPS, W. Energy-aware peering routing protocol for indoor hospital body area network communication. *Procedia Computer Science* 10 (2012), 188–196.
- [23] KHAN, Z.; SIVAKUMAR, S.; PHILLIPS, W.; ROBERTSON, B. 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* (2012), IEEE, pp. 178–185.

- [24] KHAN, Z. A.; SIVAKUMAR, S.; PHILLIPS, W.; ROBERTSON, B. A qos-aware routing protocol for reliability sensitive data in hospital body area networks. *Procedia Computer Science* 19 (2013), 171–179.
- [25] LAI, X.; LIU, Q. A survey of body sensor networks. *Sensors* 13, 5 (2013), 5406–5447.
- [26] LATRÉ, B.; BRAEM, B.; MOERMAN, I.; BLONDIA, C.; DEMEESTER, P. A survey on wireless body area networks. *Wireless Networks* 17, 1 (2011), 1–18.
- [27] LATRÉ, B.; BRAEM, B.; MOERMAN, I.; BLONDIA, C.; REUSENS, E.; JOSEPH, W.; DEMEESTER, P. 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* (2007), IEEE, pp. 1–8.
- [28] LEVIS, P.; MADDEN, S.; POLASTRE, J.; SZEWCZYK, R.; WHITEHOUSE, K.; WOO, A.; GAY, D.; HILL, J.; WELSH, M.; BREWER, E., ET AL. Tinyos: An operating system for sensor networks. In *Ambient intelligence*. Springer, 2005, pp. 115–148.
- [29] LINDSEY, S.; RAGHAVENDRA, C. S. Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems. In *IEEE Aerospace Conference, 2002* (2002), vol. 3, IEEE, pp. 3–3.
- [30] MASKOOKI, A.; SOH, C. B.; GUNAWAN, E.; LOW, K. S. Opportunistic routing for body area network. In *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE* (2011), IEEE, pp. 237–241.
- [31] MONOWAR, M. M.; BAJABER, F. On designing thermal-aware localized qos routing protocol for in-vivo sensor nodes in wireless body area networks. *Sensors* 15, 6 (2015), 14016–14044.
- [32] MOVASSAGHI, S.; ABOLHASAN, M.; LIPMAN, J. Energy efficient thermal and power aware (etpa) routing in body area networks. In *IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (2012), IEEE, pp. 1108–1113.
- [33] MOVASSAGHI, S.; ABOLHASAN, M.; LIPMAN, J. A review of routing protocols in wireless body area networks. *Journal of Networks* 8, 3 (2013), 559–575.
- [34] MOVASSAGHI, S.; ABOLHASAN, M.; LIPMAN, J.; SMITH, D.; JAMALIPOUR, A. Wireless body area networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16, 3 (2014), 1658–1686.
- [35] NEGRA, R.; JEMILI, I.; BELGHITH, A. Wireless body area networks: Applications and technologies. *Procedia Computer Science* 83 (2016), 1274–1281.
- [36] OEY, C.; MOH, S. A survey on temperature-aware routing protocols in wireless body sensor networks. *Sensors* 13, 8 (2013), 9860–9877.
- [37] PERKINS, C.; BELDING-ROYER, E.; DAS, S. Rfc3561: Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing, 2003.

- [38] QUWAIDER, M.; BISWAS, S. Probabilistic routing in on-body sensor networks with postural disconnections. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobility management and wireless access* (2009), ACM, pp. 149–158.
- [39] RAFATKHAH, O.; LIGHVAN, M. Z. M2e2: a novel multi-hop routing protocol for wireless body sensor networks. *Int J Comput Netw Commun Secur* 2, 8 (2014), 260–267.
- [40] RAZZAQUE, M. A.; HONG, C. S.; LEE, S. Data-centric multiobjective qos-aware routing protocol for body sensor networks. *Sensors* 11, 1 (2011), 917–937.
- [41] RODGERS, M. M.; PAI, V. M.; CONROY, R. S. Recent advances in wearable sensors for health monitoring. *Sensors* 15, 6 (2015), 3119–3126.
- [42] RUZZELLI, A. G.; JURDAK, R.; O’HARE, G. M.; VAN DER STOK, P. Energy-efficient multi-hop medical sensor networking. In *Proceedings of the 1st ACM SIG-MOBILE international workshop on Systems and networking support for healthcare and assisted living environments* (2007), ACM, pp. 37–42.
- [43] SMITH, D.; MINIUTTI, D.; HANLEN, L.; RODDA, D.; GILBERT, B. Dynamic narrowband body area communications: Link-margin based performance analysis and second-order temporal statistics. In *IEEE Wireless Communication and Networking Conference* (2010).
- [44] SRUTHI, R. Medium access control protocols for wireless body area networks: A survey. *Procedia Technology* 25 (2016), 621–628.
- [45] TANG, Q.; TUMMALA, N.; GUPTA, S. K.; SCHWIEBERT, L. Communication scheduling to minimize thermal effects of implanted biosensor networks in homogeneous tissue. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 52, 7 (2005), 1285–1294.
- [46] TANG, Q.; TUMMALA, N.; GUPTA, S. K.; SCHWIEBERT, L. Tara: thermal-aware routing algorithm for implanted sensor networks. In *International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems* (2005), Springer, pp. 206–217.
- [47] ULLAH, S.; MOHAISEN, M.; ALNUEM. A review of ieee 802.15. 6 mac, phy, and security specifications. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 9, 4 (2013).
- [48] WATTEYNE, T.; AUGÉ-BLUM, I.; DOHLER, M.; BARTHEL, D. Anybody: a self-organization protocol for body area networks. In *Proceedings of the ICST 2nd international conference on Body area networks* (2007), ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), p. 6.
- [49] ZANG, W.; LI, Y. Gait-cycle-driven transmission power control scheme for a wireless body area network. *IEEE journal of biomedical and health informatics* 22, 3 (2017), 697–706.